INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | ORIGEN DE LA MULTICELULARIDAD | FÁRMACOS CONTRA LA DEPRESIÓN | EL TELESCOPIO HERSCHEL | N.° 437 | FEBRERO 2013

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

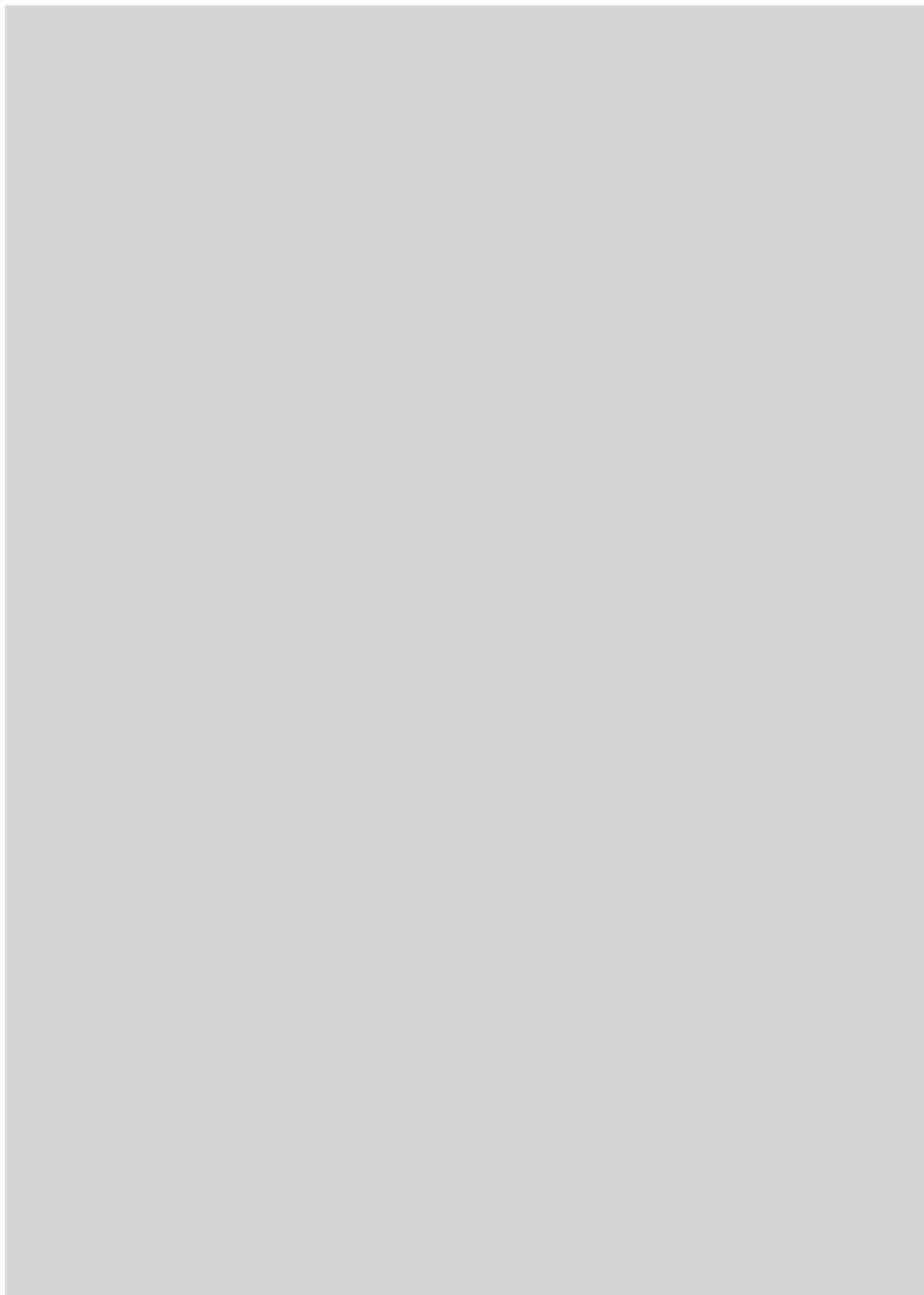
El origen de la multicelularidad

Nuevos hallazgos sobre la transición evolutiva que dio lugar a los animales



6,50 EUROS


BRIAN SMITH



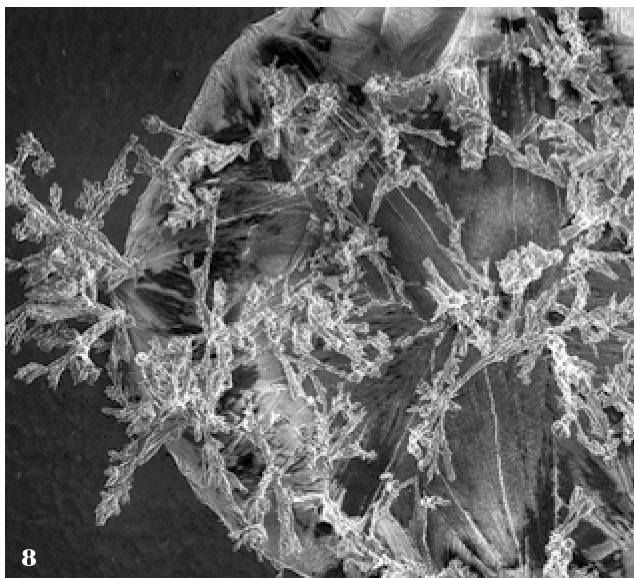
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Febrero 2013, Número 437

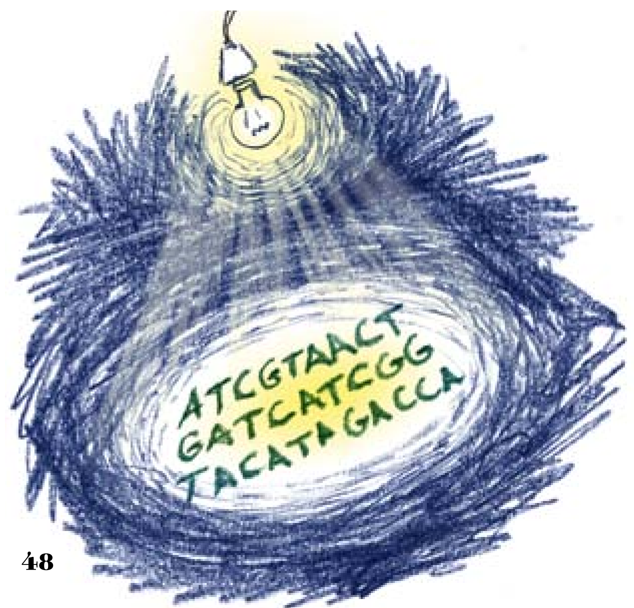
28

ARTÍCULOS

CORTESÍA DE GEORGE EASTMAN HOUSE


8


14



48

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La aparición de los animales constituye uno de los hitos más importantes de la historia de la vida. El estudio del genoma de organismos unicelulares ancestrales como el ictiospóreo *Sphaeroforma arctica* aporta información clave sobre esta transición evolutiva hacia la multicelularidad. Fotomontaje a partir de una microscopía cedida por el proyecto Multicellgenome.

redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto y diciembre 2012

ARSÉNICO SILENCIOSO

Con relación al artículo «La verdad sobre el caso Lafarge» [por José Ramón Bertomeu Sánchez; Investigación y Ciencia, agosto de 2012], me permito hacerles llegar algunas consideraciones. La peligrosidad del arsénico se conoce desde antaño. En el caso Lafarge, la responsabilidad de Marie Cappelle fue probada al certificarse que había adquirido a un farmacéutico, pidiéndole que guardase secreto, cantidades considerables de arsénico; destinado, según ella, a matar ratas. Sobre los argumentos legales que cuestionaban la metodología científica de Orfila, Raspail llegó a plantear en el juicio que Orfila podía encontrar arsénico «por todos lados, incluso en la peluca del presidente de la Corte de Apelaciones». Tan de moda se puso asesinar con arsénico que, en 1846, se promulgó en Francia un decreto que prohibía la venta libre del producto.

Pero el arsénico no solo ha sido utilizado como veneno. Uno de los usos más difundidos de este metaloide fue como medicamento contra la sífilis. Paul Ehrlich dedicó su vida al estudio del compuesto 606, comercializado después como Salvarsán («arsénico inocuo»), si bien el tiempo acabaría demostrando que su uso tampoco se encontraba exento de riesgos. La repercusión del «arsénico inocuo» fue tal que, al poco tiempo, en la Argentina se estrenaba un tango intitulado *El 606*.

Hoy son miles las víctimas que, en numerosas partes del mundo, perecen a causa del consumo crónico de aguas contaminadas con arsénico. La intoxicación crónica (hidroarsenicismo crónico regional endémico, o HACRE) fue descrita en 1913 en la Argentina a raíz de la ingestión de agua de pozo en la localidad cordobesa de Bell Ville. Próximos a cumplir cien años de aquel flagelo, este asesino silencioso continúa cobrándose víctimas más allá de las pruebas periciales que lo incriminan.

Dr. Eduardo Scarlato
Hospital de Clínicas José de San Martín
Universidad de Buenos Aires

Responde Bertomeu: *Los comentarios del Dr. Scarlato ponen de manifiesto la larga historia del arsénico en ámbitos muy variados, desde el crimen hasta la medicina, pasando por los accidentes industriales y el riesgo ambiental. Los lectores podrán encontrar muchos más detalles en la obra de John Parascandola,* King of Poisons *(Potomac Books, 2012).*

Creo, sin embargo, que hay dos cuestiones que conviene aclarar. En primer lugar, los años del caso Lafarge (1840) coinciden con el mayor número de envenenamientos con arsénico en Francia. Posteriormente, los casos disminuyeron y otros venenos más complicados de detectar fueron destronando al «rey de los venenos». Por otra parte, las pruebas testificales, como la compra de arsénico por Marie Lafarge, nunca permitieron demostrar la culpabilidad de la acusada. Al menos así lo entendieron los jueces, el fiscal y los abogados, quienes solicitaron hasta cuatro pruebas periciales. Las declaraciones de los testigos solamente ofrecieron indicios indirectos y, en algunos casos, contradictorios. Además, el amplio uso del arsénico en la vida cotidiana (como matarratas, por ejemplo) hacía posible explicar, sin necesidad de recurrir a intenciones criminales, las abundantes cantidades de este veneno adquiridas por Marie Lafarge.

La prueba se buscó a través de la alta sensibilidad de los nuevos métodos de análisis químico, pero las expectativas no se cumplieron y el fallo del jurado provocó una controversia que se extendió y amplió a lo largo de los meses siguientes, sin que pudiera nunca llegar a resolverse. Por ello, el caso Lafarge es un buen antídoto contra la excesiva confianza en las pruebas periciales para resolver asuntos judiciales.

¿ELECTROLISIS MARINA?

En el artículo «Sistemas geotérmicos mejorados» [Investigación y Ciencia, diciembre de 2012], Karl Urban menciona la posibilidad de aprovechar la energía de las fumarolas negras submarinas y añade que «aunque la idea funcionase, solo podrían beneficiarse de ella los países que, al igual que México, cuentan con acceso a volcanes marinos cercanos a la costa».

Supongo que esta restricción se debe a la dificultad de transportar a tierra la energía eléctrica generada. Pero ¿no podría emplearse esa electricidad para alimentar cubas electrolíticas que, a partir del agua de mar, obtuvieran hidrógeno, oxígeno y, tal vez, otros elementos como cloro, sodio o magnesio? Las sustancias gaseosas podrían almacenarse en contenedores especiales y llevarse a tierra para su distribución. ¿Sería rentable?

Tomás González
Doctor en química
Valladolid

Responde Urban: *Hoy por hoy, el modo en que la energía procedente de volcanes submarinos podría transportarse o usarse in situ no supone más que mera especulación. Hasta ahora su explotación solo ha sido evaluada a muy grandes rasgos por Gerardo Hiriart, geofísico de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyos resultados fueron presentados en 2010 en una conferencia en Bali: http://bit.ly/10w61aM.*

Hiriart añade que dichos volcanes constituyen hábitats muy exóticos, por lo que deberían tomarse precauciones extremas. Probablemente, una ganancia neta de energía resultase menos problemática que la obtención a gran escala de las sustancias disueltas; pero, hasta donde puedo afirmar, a día de hoy aún no existen estudios al respecto.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



NEUROCIENCIA

Mamíferos modelo

La neurobióloga de la Universidad de Cambridge Jenny Morton esperaba, cuando empezó a trabajar con ovejas, vérselas con unos animales dóciles y tontos. Descubrió, sin embargo, que eran complejas y curiosas. Esta especialista en enfermedades neurodegenerativas, como la de Huntington, participa en la evaluación de las ovejas como nuevos modelos animales de tamaño grande para el estudio de trastornos del cerebro humano.

La enfermedad de Huntington es una dolencia hereditaria y mortal que provoca una cascada de muertes celulares en la región de los ganglios basales del cerebro. La idea de utilizar ovejas para estudiarla surgió en 1993 en Nueva Zelanda, un país en el que las ovejas son siete veces más numerosas que los seres humanos. Ya se conocían algunos trastornos que se dan tanto en humanos como en ovejas, pero Richard Faull, neurólogo de la Universidad de Auckland, y Russell Snell, experto en genética, tenían una idea más ambiciosa. Decidieron desarrollar una línea de ovejas con la enfermedad (que se produce por repeticiones dentro de un único gen, el *IT15*) con la esperanza de observar el avance de la misma y desarrollar un tratamiento. Consiguieron su objetivo en 2006, después de prolongados esfuerzos.

¿Por qué con ovejas? En primer lugar, tienen un cerebro voluminoso, equiparable al de los macacos, los otros animales grandes que se están usando actualmente para estudiar esta enfermedad, y con circunvoluciones corticales desarrolladas, como el nuestro. Además, las ovejas se pueden criar en grandes corrales con sus congéneres y es fácil tenerlas bajo observación a distancia, con mochilas registradoras de datos; ello permite estudiarlas en un entorno natural, con menos problemas éticos que si se investigase con primates enjaulados. Además, estos animales longevos y sociales son activos y expresivos, reconocen rostros y tienen buena memoria. También aprenden rápidamente y no son reacios a participar en experimentos. Esto ha permitido que Morton desarrolle pruebas cognitivas similares a las realizadas con humanos que sufren este trastorno. Los investigadores pueden estudiar la evolución completa de la enfermedad de Huntington, que en humanos está asociada a un declive gradual, tanto mental como de las habilidades motoras, y comparar los cambios en las ovejas con el comportamiento normal de los animales sanos.

La primavera que viene, Faull, Snell, Morton y sus colaboradores comenzarán a observar dos rebaños de ovejas con huntington en Australia. Un rebaño recibirá una de las terapias más prometedoras creadas hasta el momento, un virus que silencia las mutaciones del *IT15*, mientras que el otro servirá como grupo de control.

Actualmente, no hay cura para ninguna enfermedad del cerebro humano. Los investigadores creen que estos estudios podrían constituir un hito en la lucha contra las dolencias neurodegenerativas.

—Daisy Yuhas

ECOLOGÍA

Jardineros crípticos

Las ratas topo, conocidas por sus pequeños ojos, su cuerpo que parece una larva y, en algunos casos, su piel desnuda, viven la mayor parte del tiempo bajo tierra. Aun así, parecen afectar radicalmente a los procesos ecológicos de la superficie. Un estudio reciente, publicado en el *Journal of Zoology*, ha mostrado que la actividad excavadora de las ratas topo influye mucho en la composición de la flora de uno de los «puntos calientes» de la biodiversidad en África, el *fynbos* (la vegetación arbustiva) de la región del Cabo, en Sudáfrica.

Al excavar sus madrigueras, las ratas topo revuelven la tierra junto con la vegetación, alimentos no comidos, orina y heces. Después, expulsan de la madriguera esta mezcla de materia orgánica e inorgánica, formando los conocidos montículos.

Un grupo de científicos de la Universidad de Pretoria encontró que la tierra de los montículos constituía una abundante fuente de nutrientes para las plantas. Contenía, en comparación con las muestras de control, altas concentraciones de nitrógeno, magnesio, potasio, sodio y calcio. La tierra removida estaba formada además por partículas más finas, como si un jardinero experto la hubiese aireado y preparado para que conservase la mayor cantidad posible de agua.

Las plantas aprecian mucho las zonas con alta concentración de minerales; esos científicos han encontrado que las ratas topo hacían que la diversidad vegetal aumentase sobre sus montículos, quizás al extirpar o enterrar las plantas más comunes y proporcionar así a otras la oportunidad de colonizar esos sitios. Sin embargo, la cantidad total de materia vegetal, la «biomasa vegetal», se reducía en los montículos. Tanto las ratas topo como el ganado prefieren alimentarse en zonas con una tierra muy rica, lo que puede limitar la biomasa hasta de la población vegetal más exuberante. Además, los roedores a veces entierran plantas vivas al expulsar los desechos de sus madrigueras, con lo que retiran esas plantas de las cifras de biomasa.

Este estudio nos recuerda que los animales pueden tener efectos inesperados en el medio y que una extinción puede entrañar consecuencias imprevistas.

—Anne-Marie Hodge



Rata topo desnuda

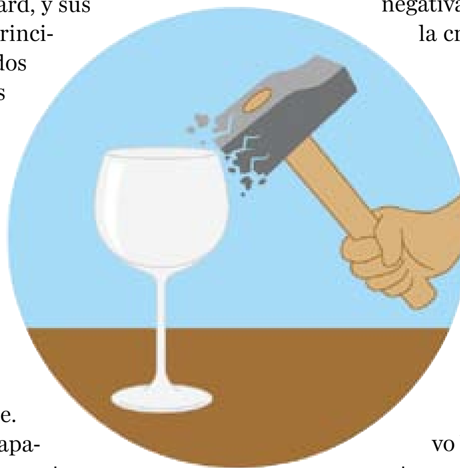
GETTY IMAGES (*oveja*); FRANS LANTING, CORBIS (*rata topo*)

MATERIALES

Romper más para romper menos

El secreto de conseguir que algo se rompa menos es hacer que se rompa más, al menos a nivel microscópico. Cuando algo frágil, como el vidrio, se rompe, las únicas moléculas afectadas son las que se encuentran en la superficie de los trozos. Dentro de cada fragmento, el material prácticamente no sufre cambios. Para reducir esa fragilidad se diseñan materiales que distribuyen la tensión bajo la superficie, evitando así que se propaguen las grietas y que el objeto se rompa.

Zhigang Suo, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores han aplicado ahora este principio a una clase de materiales denominados hidrogeles, compuestos por agua y redes de largos polímeros que actúan a modo de andamiaje. Los hidrogeles de Suo, que tienen una consistencia similar a la de la goma, pueden estirarse sin romperse hasta una longitud veinte veces superior a su tamaño original. En comparación, una goma elástica normal se romperá si se la estira hasta una longitud seis veces mayor que la normal, señala Suo. El nuevo material también presenta una tenacidad notable. La tenacidad, en sentido técnico, es la capacidad de absorber presión, tensión o un impacto sin romperse. La energía necesaria para romper este hidrogel es diez veces superior a la de materiales similares.



Los hidrogeles anteriores carecían de tenacidad y a menudo se desmenuzaban como si fueran tofu. El secreto del hidrogel de Suo es que no contiene un andamiaje de polímero, sino dos. El primero está formado por largas cadenas de carbohidratos derivadas de las algas. Las cadenas, que se mantienen unidas por iones de calcio con carga positiva, se emparejan como los dos lados de una cremallera.

El andamiaje secundario es un polímero sintético cuyas largas cadenas se unen unas a otras mediante fuertes enlaces. Cuando el material sufre un impacto, las cadenas derivadas de las algas se separan y los iones de calcio se dispersan en el agua. La red secundaria distribuye la tensión a mayor profundidad, por debajo de la superficie que se resquebraja, de manera que la energía se disipa en un mayor volumen de material. Una vez que la tensión desaparece, el material se repara a sí mismo porque los iones de calcio, atraídos por los segmentos con carga negativa de la cadena de las algas, cierran de nuevo la cremallera de la red primaria.

El nuevo material, aunque aún no está listo para airearlo, muestra que los hidrogeles pueden ser suficientemente fuertes en aplicaciones como la ingeniería de tejidos y la fabricación de prótesis. «Actualmente, si un cartílago está dañado, es muy difícil remplazarlo», afirma Suo. Cualquier sustituto artificial tendría que ser al menos tan resistente como el material natural. Suo y sus colaboradores publicaron este trabajo en el número del 6 de septiembre de *Nature*.

La energía necesaria para romper el nuevo hidrogel es «verdaderamente impresionante», según Jian Ping Gong, de la Universidad de Hokkaido, que dirigió en 2003 el equipo que creó los primeros hidrogeles de red doble. Gong señala, sin embargo, que la autorreparación del nuevo material no es completa y que se produce con cierta lentitud, a lo largo de varias horas. Para que pueda usarse en aplicaciones prácticas, habría que conseguir una autorreparación del cien por cien, apunta, y debería efectuarse en menos tiempo.

—Davide Castelvecchi

PATENTES

Microherramientas y bandejas de cristalización: Las proteínas catalizan reacciones, conforman las células y transmiten señales a través del cuerpo. Para entender cómo funcionan, los investigadores han de descubrir primero su forma tridimensional. Parte de ese proceso implica cristalizar las proteínas en unas bandejas rectangulares con cientos de pocillos. El utillaje que se utiliza hoy para cristalizar las proteínas tiene defectos: las diminutas herramientas que se emplean para manipular los cristales de proteínas son rígidas, vibran fácilmente y pueden dañar muestras frágiles. Descontento con estos fallos, Robert Thorne, físico de la Universidad Cornell, desarrolló nuevas herramientas y bandejas.



La patente n.º 8.210.057 describe unas herramientas fabricadas con película de plástico. Una suave curvatura les proporciona resistencia, de manera que son muy finas, pero no se vencen. Esta misma estrategia se puede encontrar en las hojas y pétalos naturales, señala Thorne. Una de las herramientas tiene «dedos» que se doblan y que agarran con suavidad los cristales de proteínas. La patente n.º 7.666.259 detalla un nuevo tipo de bandeja de cristalización de proteínas, en la que los pocillos han sido sustituidos por una película con microtextura. Las gotas se mantienen en la superficie incluso cuando se pone boca abajo la bandeja, sujetas por la tensión superficial creada por unos anillos impresos de solo 25 micras de alto. Las herramientas ya están a la venta y las bandejas llegarán al mercado a finales de este año.

—Marissa Fessenden

THOMAS FUCHS (*ilustración*); DE «DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE X-RAY TRANSPARENT CRYSTALLIZATION PLATES FOR IN SITU PROTEIN CRYSTAL SCREENING AND ANALYSIS», POR AHMED S. M. SOLIMAN ET AL., EN *ACTA CRYSTALLOGRAPHICA SECTION D*, VOL. 67, N.º 7, JULIO DE 2011 (*bandeja de cristalización*)

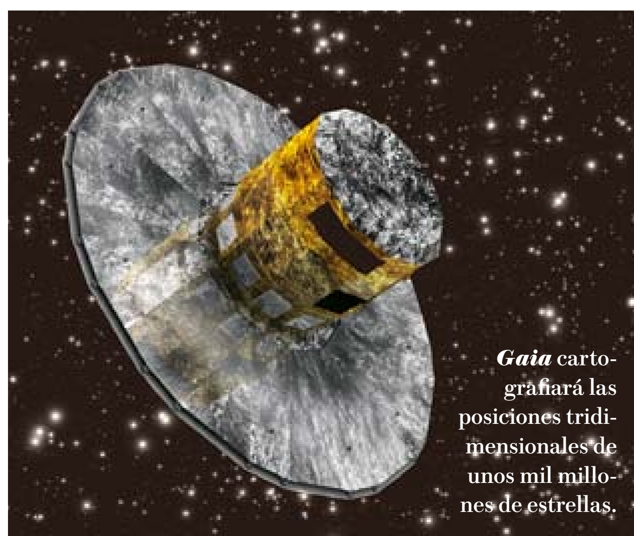
ASTRONOMÍA

Usted está aquí

Como los topógrafos que describen un terreno a partir de la medida de ángulos, distancias y alturas, los astrónomos llevan mucho tiempo cartografiando la situación de los astros en el cielo.

Esos mapas celestiales van a sufrir revisiones importantes. Nuevas recolecciones de datos, obtenidos por los telescopios terrestres o con naves espaciales, aportarán una gran cantidad de nuevos detalles. En conjunto, estos proyectos catalogarán información sobre las posiciones de varios miles de millones de estrellas y galaxias, cercanas y lejanas.

A la próxima generación de telescopios espaciales pertenecerá Euclides, que escrutará los cielos durante seis años para cartografiar en tres dimensiones dos mil millones de galaxias. La misión, aprobada el pasado mes de junio por la Agencia Espacial Europea, comenzará en 2020 y barrerá un tercio del cielo para medir las posiciones y distancias de las galaxias a lo largo del universo. Se tiene la esperanza de que la distribución de la estructura cósmica revele algún indicio oculto sobre la naturaleza de la energía oscura, el ente desconocido que impulsa la expansión acelerada del universo.



Gaia **cartografiará las posiciones tridimensionales de unos mil millones de estrellas.**

Antes de eso, gracias a la nave espacial *Gaia*, de la Agencia Espacial Europea, cuyo lanzamiento está previsto para el año que viene, conseguiremos ya una gran mejora de la cartografía celeste. Cuando haya llegado al espacio profundo, mucho más allá de la órbita de la Luna, cartografiará las posiciones y distancias de aproximadamente mil millones de estrellas. «El objetivo científico principal consiste en estudiar nuestra Vía Láctea, su estructura y su dinámica», afirma Timo Prusti, científico del proyecto Gaia.

Mientras tanto, en la Tierra de nuevo, están empezando un gran número de estudios del cosmos en el hemisferio sur, donde los cartógrafos celestes encuentran mejores condiciones para sus investigaciones. En el hemisferio norte, la decana de todas las investigaciones astronómicas, el Sondeo Digital del Cielo Sloan, ya cartografió meticulosamente, desde Nuevo México, más de un millón de galaxias en tres dimensiones, además de otros muchos logros.

El telescopio con mayor probabilidad de reescribir los libros de texto sobre el cielo del hemisferio sur es el Gran Telescopio para Estudios Sinópticos (LSST, según sus siglas en inglés), en Chile. Según las previsiones, cuando se ponga en servicio en torno al año 2022 dispondrá de un espejo primario de 8,4 metros (mucho mayor que el espejo del telescopio Sloan, que mide solo 2,5 metros) y de una cámara digital de 3,2 gigapíxeles. Este gigantesco telescopio tomará imágenes de los cielos cada semana para captar fenómenos transitorios, como las supernovas y el paso cerca de la Tierra de asteroides que puedan suponer un peligro. Determinará la posición tridimensional de unos cuatro mil millones de galaxias.

—John Matson

¿QUÉ ES ESTO?

Sal de la atmósfera: Hollie Rosier, de la Universidad de Swansea, en Gales, estudia los pequeños granos de sal que hay en la atmósfera y el modo en que afectan a los reactores de los aviones. El grano de sal de esta imagen tiene dos milímetros de diámetro. «La sal, junto con las altas temperaturas y los gases de escape, podría acelerar la corrosión», concluye Rosier. Esta fotografía microscópica se tomó durante uno de sus experimentos y ganó no hace mucho el concurso «La investigación como arte», que su universidad celebra cada año.

—Ann Chin



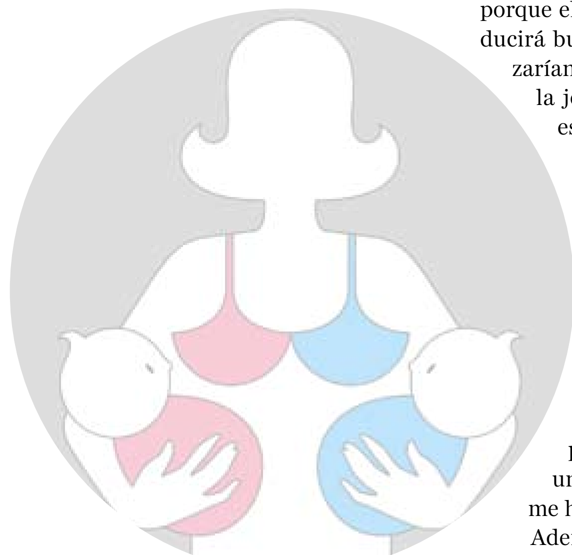
CORTESÍA DE C. CARREAU, *ESA (telescopio espacial)*; CORTESÍA DE HOLLIE ROSIER, UNIVERSIDAD SWANSEA *(grano de sal)*

EVOLUCIÓN

Leche materna para niños y leche materna para niñas

Puede que la leche materna sea el primer alimento, pero no siempre es igual. Se ha descubierto que, en los humanos y en otros mamíferos, la composición de la leche cambia dependiendo del sexo del niño y de si las condiciones que lo rodean son buenas o no. Estudiar esas diferencias puede ayudar a conocer mejor la evolución humana.

Un grupo de investigadores de la Universidad estatal de Michigan y otras instituciones descubrió que, entre 72 mujeres de las zonas rurales de Kenia, la leche de las que tenían hijos varones solía ser más rica (2,8 por ciento de materia grasa) que la de las madres que tenían una hija (0,6 por ciento). Las mujeres pobres, sin embargo, favorecían a sus hijas con una leche con más nata (2,6 en comparación con el 2,3 por ciento). Estos resultados, publicados en septiembre en el *American Journal of Physical Anthropology*, recuerdan a trabajos anteriores que mostraron que la composición de la leche dependía en las focas grises y en los ciervos comunes del sexo de la cría, y del sexo de la cría y del estado de la madre en los macacos rhesus. El nuevo estudio también fue precedido por datos que mostraban que las madres en buenas condiciones económicas y bien alimentadas de Massachusetts producían leche con mayor densidad de energía para los niños varones.



En conjunto, los estudios respaldan una teoría de la biología evolutiva elaborada hace cuatro décadas. Según la hipótesis de Trivers-Willard, la selección natural favorece que los progenitores inviertan en hijas en épocas difíciles y en hijos en épocas fáciles. Este desequilibrio debería ser mayor en las sociedades polígamas, donde los hombres pueden engendrar hijos con varias mujeres, como sucede en las aldeas de Kenia. En esas sociedades, un hijo puede crecer para convertirse en un varón fuerte y popular, con muchas mujeres y niños, o puede acabar sin ambos. Los padres acomodados que pueden permitirse invertir en sus hijos varones deberían hacerlo, porque su apuesta podría darles muchos nietos. En cambio, los padres pobres no deberían invertir mucho en hijos varones, porque ello muy probablemente no producirá buenos resultados, ya que empezarían su vida en la parte inferior de la jerarquía socioeconómica. Para esas familias, las hijas constituyen una apuesta más segura, porque si sobreviven hasta la edad adulta probablemente se convertirán en madres.

El nuevo estudio es «emocionante y fascinante», afirma Robert Trivers, experto en biología evolutiva de la Universidad Rutgers y uno de los autores de la hipótesis, que no participó en la investigación. «Es un efecto Trivers-Willard que no me habría atrevido a predecir.»

Además de la grasa y las proteínas, también pueden variar en los humanos otros componentes de la leche, explica Katie Hinde, profesora de biología evolutiva humana en la Universidad Harvard. Hinde ha encontrado niveles mayores de cortisol, una hormona que regula el metabolismo, en la leche de hembras de macaco rhesus que habían tenido una cría macho. Su trabajo muestra que las diferencias en la leche podrían cambiar el comportamiento de las crías y afectar al crecimiento y al desarrollo. «Lo que produce la madre es solo una mitad de la historia», afirma Hinde. «La otra es la forma en que la cría aprovecha la leche.» Estos resultados podrían ayudar a mejorar la leche artificial para bebés; se podría ajustar su composición para optimizar el desarrollo tanto de los niños como de las niñas.

—Marissa Fessenden

THOMAS FUCHS (*leche materna*); RUBÉN DURO (*Microvida*)

AGENDA

CONFERENCIAS

7 de febrero
Biotecnología y medioambiente: 50 años caminando de la mano
Juan Luis Ramos, Estación Experimental del Zaidín (CSIC)
Museo Nacional de Ciencia y Tecnología
Madrid
Ciclo de conferencias del cincuentenario de la SEBBM
www.sebbm.es/ES/50-aniversario_16

20 de febrero
La conjetura de Poincaré en perspectiva
José M.ª Montesinos, UCM y RAC
Seminario de Historia de la Matemática
Facultad de Ciencias Matemáticas
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
www.mat.ucm.es

EXPOSICIONES

Hasta el 31 de marzo
Microvida. Más allá del ojo humano
Cosmocaixa
Madrid
obrasocial.lacaixa.es



Hasta el 15 de junio
Cuando la Tierra tiembla: Volcanes y terremotos
Museo de la Ciencia y el Agua
Murcia
www.cienciayagua.org

OTROS

6, 13 y 20 de febrero 2013 – Seminario para el profesorado
Investigación en biomedicina
Varios investigadores
Delegación del CSIC en Cataluña
Barcelona
www.dicat.csic.es > Divulgación

14 de febrero
Jornada de bioestadística para periodistas y comunicadores
Centro Nacional de Investigaciones Cardiovasculares
Madrid
aecomunicacioncientifica.org

ASTRONOMÍA

Superabundancia de planetas

Las búsquedas sistemáticas revelan un cielo henchido de mundos extraterrestres

• Estrellas anfitrionas

Exoplanetas confirmados a día 9 de septiembre de 2012
(por simplicidad, las órbitas se muestran estilizadas)

Gigantes gaseosos: Planetas semejantes a Júpiter o Saturno



Jupíteres calientes: Planetas gigantes que orbitan muy cerca de su estrella anfitriona



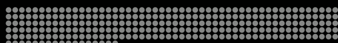
Neptunos calientes: Planetas de tamaño intermedio que orbitan muy cerca de su estrella anfitriona



Planetas rocosos: Planetas pequeños que exhiben una superficie sólida, como la Tierra



Sin identificar



0 horas
6 h
12 h
18 h
Hemisferio boreal
Osa menor
Hemisferio austral
Cruz del Sur

Total: 629
Descubrimientos de la misión Kepler: 104

Durante los últimos veinte años, los astrónomos han identificado cientos de planetas que orbitan en torno a estrellas lejanas. Esa cifra, sin embargo, no parece ser más que la punta del iceberg: en torno a un pequeño grupo de estrellas que no abarcan más que el uno por ciento del cielo, la misión Kepler, de la NASA, ha descubierto ya más de cien planetas, así como indicios de la existencia de miles de ellos más. No existe ninguna razón para pensar que otras regiones del cielo deban encontrarse menos pobladas. Un estudio reciente calculó que cada estrella debería albergar un promedio de 1,6 planetas. Los expertos aún han de encontrar el primero cuyas condiciones permitan la existencia de vida, pero las probabilidades de éxito se muestran cada vez más altas.

—John Matson

FUENTES: THE EXOPLANET DATA EXPLORER, EXOPLANETS.ORG; PLANETQUEST.JPL.NASA.GOV; «THE EXOPLANET ORBIT DATABASE», POR J. T. WRIGHT ET AL., EN *PUBLICATIONS OF THE ASTRONOMICAL SOCIETY OF THE PACIFIC*, VOL. 123, N.º 902, 2011; JAN WILLEM TULP (*gráfico*)

MECÁNICA CUÁNTICA

¿Qué bit tiene mi vecino?

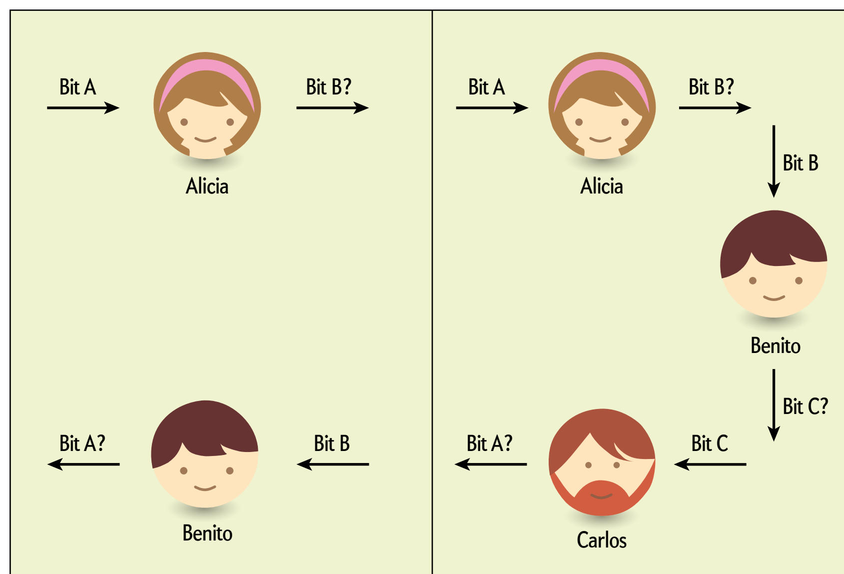
Un juego sencillo que podría ayudarnos a entender mejor las correlaciones cuánticas

Un empleado español choca la mano de un cliente japonés al despedirse en el aeropuerto. Al cabo de pocos días, ambos se encuentran enfermos y con síntomas muy parecidos. ¿Ha contagiado uno de ellos al otro? Quizá. Pero también podría ocurrir que entre sus enfermedades no existiese ningún tipo de relación. Uno de los objetivos principales de cualquier teoría científica consiste en entender el origen de las correlaciones existentes entre fenómenos que ocurren en puntos distintos del espaciotiempo. Si una observadora, a quien llamaremos Alicia, realiza una acción en cierto lugar y en cierto momento, ¿cómo afectará ello a los actos que Benito llevará a cabo más tarde en otro lugar? Esta pregunta, de carácter universal, reviste un interés clave en toda teoría científica, desde aquellas que pertenecen al ámbito de la física hasta las que atañen a la biología o la medicina.

En principio, las correlaciones entre dos observadores distantes podrían ser arbitrarias. Sin embargo, existen preceptos muy generales y aceptados por la comunidad científica que restringen la clase de correlaciones que podemos esperar. Uno de ellos es la imposibilidad de transmitir información de manera instantánea. Si Alicia se encuentra en la Tierra y Benito vive en Marte, resulta natural suponer que los actos de Alicia no podrán influir instantáneamente sobre las acciones de Benito. Esta idea recibe el nombre de principio de no señalización. Una teoría física que respeta dicha restricción es la teoría de la relatividad de Einstein: según esta, ninguna información puede propagarse a una velocidad mayor que la de la luz. Pero, con independencia de si la velocidad de la luz coincide o no con el límite escogido por la naturaleza para regular la transmisión de información, parece muy natural suponer que debería existir una velocidad finita máxima que limita las comunicaciones entre dos puntos distantes. (En este sentido, los famosos —y ya refutados— neutrinos superlumínicos no plantean ningún conflicto con el principio de no señalización.) El conjunto formado por todas las correlaciones que resultan compatibles con el principio de no señalización recibe el nombre de conjunto de *correlaciones de no señalización*.

Supongamos, pues, que la naturaleza respeta el intuitivo principio de no señalización y consideremos dos sucesos que ocurren en puntos del espaciotiempo tan separados entre sí que ni la luz (u otra señal de velocidad máxima) ha podido viajar de uno a otro. Si observásemos correlaciones entre ellos, estas solo podrían deberse a que ambos sistemas disponían de un conjunto de «instrucciones» previas que determinaban los resultados. En nuestra vida cotidiana encontramos a menudo casos de este tipo. Si dos delincuentes acuerdan de antemano las respuestas que darán a la policía en caso de ser detenidos, sus declaraciones estarán correlacionadas aunque sean interrogados en habitaciones separadas y sin posibilidad de comunicarse. En lo que sigue, llamaremos clásicas a dichas correlaciones. Dado que estas no requieren ningún tipo de comunicación, se encuentran incluidas en el conjunto de correlaciones de no señalización.

Ahora bien, ¿qué clase de correlaciones se observan en la naturaleza, descrita por las leyes de la física cuántica? Por sorprendente que parezca, los sistemas cuánticos exhiben correlaciones que carecen de análogo clásico y que no pueden entenderse en términos de instrucciones fijadas de antemano. La existencia de tales correlaciones, denominadas no locales, constituye uno de los fenómenos menos intuitivos de la mecánica cuántica. Con todo, el empleo del término «no local» no debe inducir a engaño: a pesar de que las correlaciones cuánticas son más fuertes que las clásicas, aquellas tampoco permiten enviar información de manera instantánea. De hecho, constituyen un subconjunto estricto dentro del conjunto de correlaciones de no señalización.



Adivina el bit de mi vecino: Varios jugadores incomunicados reciben un bit aleatorio. Para ganar, cada uno de ellos debe acertar el bit de su vecino. En el caso de dos jugadores (*izquierda*), Alicia debe adivinar el bit de Benito y este, el de Alicia. En el caso de tres jugadores (*derecha*), Alicia debe adivinar el bit de Benito, quien ha de acertar el de Carlos, que a su vez debe adivinar el bit de Alicia. En general, el empleo de correlaciones cuánticas permite maximizar las posibilidades de ganar. Sin embargo, en el caso de tres jugadores o más, existen correlaciones compatibles con el principio de no señalización (la imposibilidad de transmitir información de manera instantánea) que podrían elevar aún más la probabilidad de victoria. Se desconoce por qué las leyes de la mecánica cuántica no permiten ese tipo de correlaciones.

Por último, existen también correlaciones que, si bien resultan compatibles con el principio de no señalización, son imposibles en física cuántica. Tales correlaciones reciben el nombre de *supracuánticas*. A día de hoy no disponemos de ningún indicio experimental que apunte a la existencia de correlaciones de este tipo. Por algún motivo, la física cuántica parece incluir en sus leyes todas las correlaciones que pueden darse en la naturaleza. Pero ¿por qué no existen las correlaciones supracuánticas? ¿Qué impide a la física cuántica llevar a cabo todas las correlaciones compatibles con el principio de no señalización?

Maximizar los aciertos

Supongamos ahora que Alicia y Benito participan en un juego muy simple. Cada uno de ellos será enviado a una habitación incomunicada; una vez allí, recibirá un bit aleatorio, el cual puede tomar el valor 0 o 1 con una probabilidad del 50 por ciento. Alicia y Benito ganarán el juego siempre que cada uno de ellos logre adivinar el bit de su compañero. Resulta fácil convencerse de que, si solo permitimos correlaciones clásicas, nuestros amigos pueden ganar, como máximo, la mitad de las veces. Una estrategia para lograrlo consiste en que ambos acuerden apostar que el bit de la otra parte coincidirá con el propio. Este método funcionará cuando ambos reciban el mismo bit; es decir, en la mitad de los casos. Con todo, debemos recordar que el bit que recibe cada uno de ellos no proporciona ninguna información sobre el bit del compañero.

Ahora bien, ¿qué ocurriría si Alicia y Benito pudiesen emplear correlaciones cuánticas? En general, las correlaciones cuánticas no locales permiten ganar más a menudo que las correlaciones clásicas. Sin embargo, eso no sucede en el juego descrito arriba. De hecho, el valor de 1/2 es «universal»: aun cuando Alicia y Benito pudieran emplear todas las correlaciones compatibles con el principio de no señalización —incluso las supracuánticas—, nunca podrían ganar más de la mitad de las veces. Dicho de otro modo, Alicia y Benito solo podrían aumentar sus posibilidades de victoria si sus correlaciones les permitiesen enviar información de manera instantánea.

Consideremos ahora tres jugadores: Alicia, Benito y Carlos. Al igual que antes, cada uno permanecerá recluido en una habitación y recibirá un bit aleatorio. Para ganar, cada uno de ellos deberá adivinar el bit de su vecino: Alicia, el de Benito; este, el de Carlos, y Carlos, el de Alicia. Si solo empleasen correlaciones clásicas, sus posibilidades de victoria ascenderían, a lo sumo, a 1/4. Este límite puede alcanzarse con la misma estrategia que en el caso anterior; es decir, si cada una de las partes acuerda anunciar el mismo bit que recibe (en cuyo caso ganarán siempre que sus respectivos bits sean iguales, lo cual sucederá en 1/4 de las ocasiones). De nuevo, dicho límite es universal. Afecta a todas las correlaciones compatibles con el principio de no señalización.

Introduzcamos ahora una pequeña variación en el juego. Supongamos que a los jugadores solo se les envían cuatro de las ocho combinaciones de bits posibles: 000, 011, 101 y 110. Aunque Alicia Benito y Carlos conozcan esta restricción, a priori no parece que el juego haya cambiado mucho. A fin de cuentas, el bit que recibe cada uno de ellos sigue sin proporcionar ninguna información acerca del bit de su vecino. Y, de hecho, puede demostrarse que nada mejoraría si empleasen correlaciones cuánticas. En ambos casos, la probabilidad de ganar continúa siendo, como mucho, 1/4. Se trata de un juego que tampoco goza de ventajas cuánticas.

Sin embargo, la sorpresa llega porque ahora existen correlaciones que, sin violar el principio de no señalización, ¡permiten ganar el juego con una probabilidad de 1/3! ¿Por qué? Si ahora el principio de no señalización no explica el límite clásico ni el cuántico, ¿qué principio alternativo se encuentra detrás de la cota de 1/4, el valor que satisfacen las correlaciones clásicas y cuánticas? Por algún motivo, la naturaleza parece prohibir la existencia de ciertas correlaciones de no señalización que permitirían a los jugadores obtener más información sobre el bit de sus vecinos que los casos clásico o cuántico.

El resultado descrito fue demostrado por los autores y otros colaboradores en un artículo publicado en *Physical Review Letters* en junio de 2010. Hoy por hoy, aún continuamos sin conocer la respuesta. A pesar de su sencillez, este juego parece capturar un principio que va más allá del de no señalización en un escenario con numerosos observadores. Sin duda, conocerlo nos ayudaría a identificar y comprender mejor la exótica naturaleza de la teoría cuántica y, en particular, la de las correlaciones posibles entre sistemas cuánticos.

—Mafalda Almeida
y Antonio Acín Dal Maschio
Instituto de Ciencias Fotónicas
Castelldefels, Barcelona

MEDIOAMBIENTE

Nanopartículas inorgánicas

Riesgos y beneficios ambientales

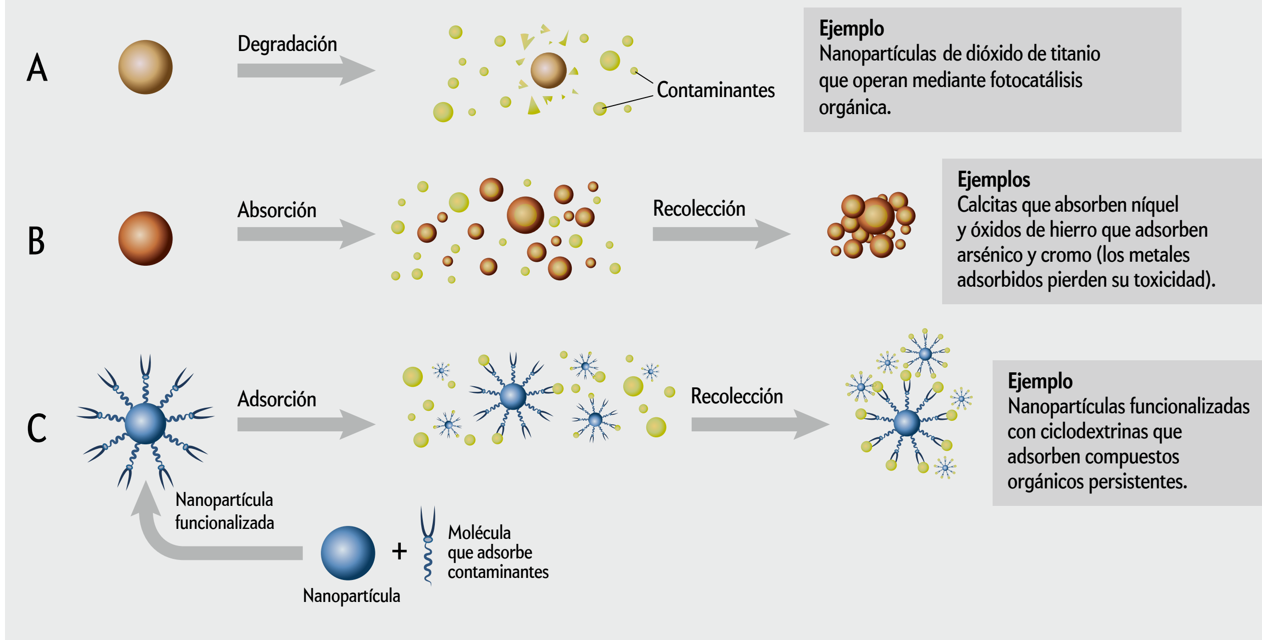
La industria de los semiconductores, la electrónica y la microelectrónica, y la fabricación de productos tan variados como cosméticos, artículos de limpieza y cuidado personal, utensilios del hogar, pinturas, prendas de vestir, componentes para el automóvil, etcétera, vienen utilizando nanopartículas (NP) y otros dispositivos y estructuras de tamaño nanométrico desde finales de los años noventa. En fecha más reciente, se ha extendido su uso a los sectores energético, biomédico, aeroespacial y de la construcción, por nombrar solo algunas aplicaciones destacadas. En numerosos casos se trata de productos que llegan directamente a los consumidores. En su uso, desecho o reciclaje, estos nanoobjetos acabarán dispersándose en el medio, por lo que su presencia no intencionada en entornos naturales y su potencial toxicidad ecológica es tema actual de debate e investigación.

Nanorremediación ambiental

Las nanopartículas se están aplicando también a la limpieza de aguas y suelos contaminados. Nos referimos a las medidas de restauración o remediación ambiental, basadas en la dispersión deliberada en el ambiente de NP diseñadas a tal fin. La ventaja de esta estrategia es que puede realizarse in situ, es decir, sin necesidad de recolectar o desplazar las masas de agua o suelo contaminadas a

MECANISMOS DE REMEDIACIÓN AMBIENTAL

Las nanopartículas que se aplican a la remediación ambiental operan mediante tres tipos de mecanismos. Algunas logran in situ una degradación completa de los contaminantes (*A*). Otras los absorben (*B*). También las hay que, previamente funcionalizadas, adsorben los elementos indeseados (*C*). En estos casos (*B* y *C*), se requiere una recolección posterior mediante gradientes gravitatorios (agregación) o magnéticos (solo si las nanopartículas son magnéticas).



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN LOS AUTORES

plantas o vertederos para su posterior tratamiento.

Las nanopartículas presentan distintas habilidades para la descontaminación. En varios casos, potencian reacciones químicas limpiadoras: el oro y la plata eliminan mercurio; los óxidos inorgánicos muestran una gran capacidad para atrapar arsénico, cromo, níquel, cadmio y otros cationes metálicos. Otras NP se funcionalizan de modo que su superficie queda cubierta de moléculas que pueden cumplir tareas específicas, como retener otras moléculas orgánicas. Por otro lado, las nanopartículas de hierro degradan la materia orgánica al oxidarse, lo que resulta en la reducción de compuestos orgánicos persistentes, como percloratos o perbromatos tóxicos que son degradados a cloruros o bromuros inocuos. Por fin, cabe destacar las NP que operan a modo de fotocatalizadores, como las de dióxido de titanio; primero absorben el residuo orgánico y luego promueven la degradación del mismo mediante la exposición a la radiación solar ultravioleta.

Nanoquímica

¿Qué hace que las nanopartículas resulten tan útiles e interesantes para la remediación ambiental? En primer lugar, su tamaño reducido maximiza la relación entre superficie y cantidad de masa (cuanto más pequeños son los objetos en que dividimos un volumen de material, mayor es la superficie de exposición). Ello reviste gran importancia para un gran número de fenómenos físicos y químicos de absorción, transformación y degradación que se dan en las superficies. Permite lograr un mismo efecto con una cantidad de material mucho menor, lo cual supone beneficios económicos (se reducen los costes) y ambientales (disminuye la dosis empleada).

En segundo lugar, debido también a su tamaño reducido, las nanopartículas presentan un mayor radio de curvatura, lo cual significa que los átomos de su superficie se hallan más expuestos. En concreto, las NP poseen una elevada densidad de átomos de baja coordinación en su exterior, aristas y bordes, de modo que presentan una superficie altamente reactiva y catalítica.

Una tercera característica derivada de las dimensiones nanométricas corresponde a la elevada movilidad de estas partículas, ya sea en medios líquidos, gaseosos o incluso sólidos, como los suelos.

Cabe resaltar que a escala nanométrica tienen lugar procesos químicos y físicos diferentes de los que operan a escalas mayores. Nos hallamos ante una nueva dinámica de los materiales. Por ello reviste gran importancia determinar los riesgos ambientales de las nanopartículas y sus posibles efectos en los organismos.

Nanopartículas naturales

Para comprender el impacto biológico y ambiental de las NP resulta de gran utilidad observar las nanoestructuras que ya existen en la naturaleza. Pensemos en los nanominerales. Estos se hallan ampliamente distribuidos por la atmósfera, las aguas superficiales y subterráneas, los suelos, y también en la mayoría de los organismos vivos. Se originan por precipitaciones, abrasión o procesos biológicos. Una de estas estructuras opera en nuestro organismo: la ferritina, una proteína presente en los mamíferos que almacena hierro en forma de NP en el interior de una cápsula de aminoácidos. También algunas bacterias poseen nanocristales de magnetita (magnetosomas), con un núcleo de óxido de hierro magnético. De hecho, las NP de hierro constituyen un fármaco aprobado para el tratamiento de la anemia ferropénica.

Existen incluso ejemplos de nanorremediación ambiental natural. La hematita nanométrica procedente de lava volcánica cataliza la síntesis de nanotubos de carbono con los humos del volcán y, posteriormente, la oxidación del manga-

neso. Ello resulta en la rápida formación de nanominerales que absorben los metales pesados dispersos en aguas y suelos, lo que promueve el saneamiento espontáneo (atenuación natural). Asimismo, ciertas bacterias sintetizan NP de selenio, mediante las cuales eliminan del medio iones metálicos tóxicos.

Entender los riesgos para aprovechar los beneficios

No solo el tamaño, la forma y la composición de una nanopartícula determinan su toxicidad. También el medio en donde se encuentran y su estado químico (de agregación, oxidación, asociación o dilución) influyen fuertemente. La nanotoxicología es precisamente hoy un campo muy activo de investigación. No interesa solo a científicos, sino también a autoridades reguladoras, la industria y pequeñas empresas, asociaciones civiles y el público en general.

En nuestro grupo hemos llevado a cabo varios estudios sobre el impacto biológico de diferentes NP inorgánicas (oro, plata, óxido de cerio, óxido de titanio y óxido de hierro) en células procariotas y eucariotas. Los resultados se publicaron en 2011 en *Trends in Analytical Chemistry* y en 2011 en *Journal of Hazardous Materials*. Demuestran que, a dosis razonables (de síntesis y aplicación), estas NP no presentan toxicidad aguda, excepto en el caso de hallarse asociadas con otros componentes tóxicos (enganchados a su superficie), ser hidrofóbicas, o estar dotadas de carga eléctrica positiva (estas dos últimas características las hacen interactuar perjudicialmente con la membrana celular). Con todo, los efectos no dependen solo de las propiedades iniciales, sino también de su particular evolución fisicoquímica en el entorno. La estabilidad química (no-corrosión) en condiciones fisiológicas parece ser uno de los requisitos para que las NP metálicas no resulten tóxicas.

En definitiva, los beneficios obtenidos del uso de las nanopartículas deben ser sopesados contra los riesgos potenciales de su introducción en el medio, cuestión que aún queda por esclarecer. Para ello es necesario un trabajo multidisciplinar que incluya nanotecnólogos así como toxicólogos, biólogos y ecólogos, y que tenga en cuenta las perspectivas industrial y reguladora. Más aún, los nanotecnólogos deben alcanzar asimismo un dominio pleno de la técnica que les permita diseñar nanoobjetos con un altísimo grado de control, para así responder a lo que serán las pautas de diseño e ingeniería de nanomateriales que surgirán desde la nanotoxicología.

—Cecilia López y Víctor Puntes
Instituto Catalán de Nanotecnología
—Antoni Sánchez
Universidad Autónoma de Barcelona

ECOLOGÍA

Ecometabolómica

Una nueva herramienta para el estudio de los ecosistemas

El cambio global está alterando la composición de los suelos y las aguas. Conocer el impacto de estas perturbaciones en los ecosistemas constituye uno de los grandes desafíos actuales de la ecología. Un nuevo campo de investigación está aportando un nuevo enfoque sobre esta cuestión mediante la aplicación de la metabolómica a los estudios ecológicos. Nos referimos a la ecometabolómica.

La metabolómica corresponde a un conjunto de técnicas de análisis químico y estadístico que permiten conocer la actividad metabólica de una célula, tejido, órgano u organismo en un momento determinado. Se aplica al estudio de las alteraciones del funcionamiento interno de los organismos a lo largo del tiempo o en respuesta a variaciones ambientales. Por ejemplo, informa sobre el cambio metabólico que produce un medicamento en un paciente a distintos intervalos de tiempo desde su aplicación. La metabolómica ha sido ampliamente utilizada en biomedicina para desarrollar fármacos, realizar el seguimiento de órganos trasplantados, investigar el curso de enfermedades o mejorar la nutrición.

Fuera del ámbito médico, el uso de la metabolómica ha sido más limitado. Se ha utilizado para investigar las respuestas de organismos a altas concentraciones de tóxicos como metales pesados o productos fitosanitarios, pero no al estudio de sistemas naturales más complejos como un bosque o un pastizal.

En los últimos lustros, numerosas investigaciones en el ámbito de la ecología han venido observando que las variaciones en la composición química elemental de los organismos y ecosistemas guardan relación con los cambios en la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas en su conjunto. En los lagos, por ejemplo, los cambios en las proporciones de nitrógeno (N) y fósforo (P) del agua y los organismos planctónicos guardan relación con la composición de la comunidad planctónica, así como con el número de niveles tróficos y complejidad de la misma. En este caso, los mecanismos que subyacen bajo estas relaciones han podido estudiarse porque se trata de un ecosistema sencillo, donde los recursos como el N y el P se asignan sobre todo al crecimiento y la reproducción.

Pero en sistemas ecológicos más complejos, con organismos dominantes de vida más larga y de mayor tamaño que los planctónicos, el N, el P y otros bioelementos como el potasio (K) pueden asignarse, además de al crecimiento y la reproducción, a otras funciones como la defensa, el almacenamiento de recursos y los mecanismos antiestrés. Ello dificulta el establecimiento de una relación entre la composición elemental y la estructura del ecosistema.

Metabolómica y ecología

La metabolómica se vislumbra como una herramienta de gran utilidad para conocer a qué funciones metabólicas se están asignando los diferentes elementos bajo una situación ambiental determinada, lo que ayudaría a entender cómo se alteran la composición de especies y la estructura de las comunidades al variar las ratios de los principales bioelementos.

Lo anterior constituye un desafío muy alentador, no solo porque permitiría ahondar en el funcionamiento de los ecosistemas, sino porque los cambios ambientales a escala global son cada vez más intensos, rápidos y amplios. A modo de ejemplos cabe citar la eutrofización de N de suelos y aguas, el incremento de CO_2 atmosférico y el propio cambio climático, fenómenos globales que amenazan con provocar desajustes notables en la ratio


Erica multiflora

N:P a escala planetaria o, por lo menos, en amplias regiones del planeta. Prever qué ecosistemas y especies pueden resultar más perjudicadas o beneficiadas por dichos cambios, así como desentrañar el mecanismo del proceso de cambio, constituiría una herramienta de gran utilidad en el marco de las políticas de protección del medio.

Resultados prometedores

Nuestro equipo ha llevado a cabo un trabajo pionero en este campo: hemos aplicado técnicas metabolómicas para intentar comprender los cambios metabólicos del brezo Erica multiflora ligados a las variaciones en las proporciones entre los bioelementos. Los resultados de la investigación se publicaron en marzo de 2012 en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Muestran que los cambios en la composición elemental en respuesta a los cambios ambientales van ligados a los diferentes usos metabólicos de los bioelementos para un funcionamiento óptimo de la planta según las necesidades que dicte el ambiente. Se observó que un aumento de las concentraciones de N y P, pero con mayor proporción de P que de N (menor ratio N:P), se relaciona con una mayor activación del metabolismo primario, destinado al crecimiento y la producción de reservas energéticas en épocas favorables. Asimismo, en condiciones de sequía se detectó un aumento de metabolitos secundarios ricos en carbono, que, junto con las mayores concentraciones de potasio, aumentan la capacidad de retención de agua.

Ese estudio abre la puerta al uso de la metabolómica en ecología y destaca su gran potencial en el estudio de las cadenas tróficas, los ciclos de los bioelementos, la autoecología de las especies o las consecuencias del cambio global.

—Jordi Sardans, Albert Rivas Ubach y Josep Peñuelas
Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF)
Unidad de Ecología Global
CREAF-UAB-CSIC

IDEAS QUE CAMBIAN EL MUNDO

Diez innovaciones tan radicales que podrían transformar nuestra vida

Ilustraciones de The Heads of State





Científicos e ingenieros sueñan con grandes adelantos que transformen el mundo, y luego tratan de hacerlos realidad. En las siguientes páginas, presentamos diez innovaciones que podrían cambiar las cosas, así una alternativa artificial al ADN, un aceite que depura el agua o unos marcapasos activados por el torrente sanguíneo. No son ideas fantásticas, son logros realizables, ya probados o que cuentan con prototipos, y en condiciones de adquirir grandes proporciones. Cada uno de ellos encierra la capacidad de tornar posible lo que hoy parece imposible.

—La redacción

Nuevas formas de vida sin ADN

Organismos artificiales que se basan en moléculas sintéticas podrían medrar y evolucionar

El ADN ES COSA DEL PASADO. Los biólogos sintéticos han inventado una serie de nuevas moléculas, los AXN, que cuentan con todas las capacidades del ácido desoxirribonucleico (ADN) y del ácido ribonucleico (ARN) más algunas otras especiales. Con los AXN se podrían crear en el laboratorio, y sin correr riesgos, formas de vida que no dependiesen del ADN para sobrevivir y evolucionar.

«La vida es inconcebible sin un sistema que se encargue de almacenar y replicar la información genética, pero el ADN y el ARN no son únicos», explica Philipp Holliger, del Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge (Inglaterra). «Hay al menos seis polímeros que se les asemejan y pueden realizar la misma función». Que la flora y la fauna de la Tierra utilicen solo el ADN y el ARN, dice, es un «accidente en el origen de la vida».

AXN son las siglas de «ácido xenonucleico» (*xeno* significa «extranjero»). Al igual que el ADN, su estructura guarda semejanza con una escalera de caracol. En el ADN, cuatro bases nitrogenadas, representadas por las letras A, C, G y T, forman los peldaños; los lados entre los que se tienden, el «esqueleto» del ADN, están hechos de grupos fosfato y azúcares. Durante 30 años se han venido manipulando los azúcares para crear ácidos nucleicos artificiales que resulten útiles en las investigaciones clínicas como herramientas que puedan unirse al ADN.

Para crear los AXN, Holliger y sus colaboradores no se limitaron a alterar los azúcares del esqueleto del ADN; los sustituyeron con moléculas completamente diferentes, como el ciclohexano y la treosa. No menos importante fue que creasen también enzimas que actúan con los AXN y forman con ellos un sistema genético completo.

Las enzimas permiten al AXN hacer lo que ningún otro ácido nucleico artificial puede: evolucionar. En el interior de las células, unas enzimas, las polimerasas, cortan, pegan y empalman ADN para acceder a la información genética. Sin esa interacción, el ADN permanecería tan inerte como las polvorientas enciclopedias de una estantería. Holliger reprogramó polimerasas naturales para traducir el ADN a AXN, y al revés; estableció así un sistema nuevo para almacenar y transmitir la información genética, que es la base de la evolución. Uno de los AXN, el AHN (ácido anhidrohexitolnucleico), conservaba los cambios fiablemente en su código genético y evolucionó de modo que se unía a una proteína con una precisión cada vez mayor.

Una vez Holliger mejore la funcionalidad del AXN y de sus enzimas, ese grupo de moléculas podría sustituir al ADN y al ARN de las células. Sería posible, por ejemplo, succionar el ADN de una simple bacteria y sustituirlo con AXN.

O bien, se podría encerrar AXN dentro de protocélulas. Se originaría así una nueva forma de vida que evolucionaría de modo impredecible. Si bien otros expertos en biología sintética, J. Craig Venter entre ellos, han logrado avances notables al reescribir el código genético existente, no se ha creado aún vida realmente sintética, una vida que no dependa de lo que la evolución ya ha proporcionado, sino de lo inventado por los seres humanos.

Holliger subraya que aún están muy lejos las formas de vida basadas en el AXN, pero les ve ya una clara ventaja. Si una criatura así escapase al mundo exterior moriría, ya que carecería de un suministro constante de enzimas específicas para el AXN. Además, el AXN no podría entretejerse en los genomas de los organismos naturales: las enzimas naturales de estos no lo reconocerían. Unas bacterias con AXN diseñadas para devorar manchas de petróleo o convertir aguas residuales en electricidad no podrían interferir en los organismos nativos.

Que el AXN sea complementario del ADN y, sin embargo, estructuralmente único le confiere una utilidad inmediata para la medicina, la biotecnología y la investigación biológica. Holliger imagina AXN que podría inyectarse en el cuerpo humano para detectar los primeros y sutiles síntomas de enfermedades que las técnicas actuales pasan por alto.

Steven Benner, de la Fundación para la Evolución Molecular Aplicada, en Gainesville (Florida), ha dado otro paso adelante: ha ampliado el alfabeto genético con dos nuevas bases nitrogenadas, Z y P. Un alfabeto mayor podría formar un conjunto mayor de genes y, por último, de proteínas. «El objetivo es crear sistemas controlados químicamente que se comporten como sistemas biológicos sin serlo», dice Benner. «Creemos que todo lo que se puede dibujar en una página se puede hacer de verdad.»

—Ferris Jabr

Espuma que devuelve la respiración

Unas microburbujas inyectables de oxígeno proporcionarían a quienes padecen asma o se han atragantado unos minutos preciosos

Solo unos pocos minutos después de que alguien deje de respirar (ya sea por un trozo de carne atascado en la garganta, un ataque grave de asma o una lesión pulmonar), el cerebro empieza a apagarse. El paro cardíaco y la muerte son inminentes. Los equipos de emergencia y el personal hospitalario tienen un recurso fundamental: insertarle al paciente a través de la boca un tubo para que respire. Este procedimiento tiene sus riesgos y lleva tiempo.

Una nueva solución inyectable podría mantener vivas a estas personas durante 15 minutos o más, con lo que se ganaría un tiempo esencial para llevarlas a un hospital o hacer alguna maniobra quirúrgica en un quirófano. La solución contiene microburbujas de oxígeno que la sangre absorbe en unos segundos. Son demasiado pequeñas para ocasionar una embolia gaseosa (una bolsa de aire que detiene el flujo de la sangre y produce así un accidente cerebrovascular o un ataque cardíaco).

Para crear esta espuma salvavidas, John Kheir, cardiólogo del Hospital Infantil de Boston, y sus colaboradores adaptaron nanotécnicas clínicas preexistentes. Las micropartículas con membranas lipídicas ya administran fármacos y aportan colorantes para la toma de imágenes mediante ultrasonidos. El equipo de Kheir propulsó fosfolípidos a través de una cámara oxigenada y con ondas acústicas hizo que los ingredientes se autoensamblasen en micropartículas. Por último, produjeron con una centrifugadora una solución muy concentrada de esas micropartículas. Cada



microburbuja, de cuatro micras de tamaño, contiene oxígeno puro, al que rodea con una película lipídica de solo unos nanómetros de espesor.

Puesto que las burbujas contienen oxígeno a una presión mayor que en el torrente sanguíneo, su gas se difunde hacia los glóbulos rojos cuando entran en contacto con ellos. Una vez se ha vaciado una burbuja, la cubierta colapsa y se convierte en un disco de menos de una micra de ancho que atraviesa con facilidad el sistema circulatorio.

En una prueba se bloquearon durante 15 minutos las vías respiratorias de conejos anestesiados. En aquellos a los que se les inyectó la solución, la probabilidad de sufrir un paro cardíaco u otros daños orgánicos fue mucho menor que en aquellos a los que se les administró solución salina, y eso sin tomar aire ni una sola vez.

Según Raymond Koehler, de la Universidad Johns Hopkins y que no participa en estas investigaciones, el enfoque resulta bastante innovador en comparación con las técnicas actuales: la mayoría de los procedimientos de emergencia para el suministro de oxígeno requieren que el sistema pulmonar funcione, como poco, a un nivel mínimo.

Un inconveniente es que, debido a que la sangre absorbe el oxígeno muy deprisa, es necesaria una perfusión constante, y ello supone la aplicación de una gran cantidad de solución salina para ayudar a que la espuma vaya entrando suavemente en el torrente sanguíneo. La cantidad de solución que un paciente recibiría en 15 minutos podría conducir a un edema, una sobrecarga de líquidos que puede ocasionar insuficiencia cardíaca. El equipo de Kheir está intentando mejorar la formulación de modo que se requiera menos solución salina.

Otro inconveniente es que, sin una respiración normal, el dióxido de carbono se acumula en el cuerpo, y es tóxico. No obstante, tal y como observa Koehler, el cuerpo puede manejar un pequeño exceso de dióxido de carbono mejor que una falta total de oxígeno. Si las microburbujas tienen éxito en ensayos posteriores con animales (y luego en humanos), la solución ayudará a los equipos de emergencia o a los técnicos de quirófano a ganar unos minutos cruciales antes de que se puedan aplicar otros tratamientos para salvar la vida del paciente. En estas situaciones se quiere tener un plan de reserva, como dice Koehler.

—Katherine Harmon

Tratamiento precoz del alzhéimer

Un ensayo clínico con 300 colombianos podría enseñar una manera de evitar que la enfermedad se inicie

La enfermedad de Alzheimer sigue siendo prácticamente intratable. Más de cien fármacos experimentales no han logrado detener la enfermedad que roba a las personas sus recuerdos, sus relaciones y, en definitiva, su identidad. Ahora se va a ensayar una nueva estrategia para evitar que este horroroso trastorno siquiera empiece. Así como personas sanas toman estatinas para reducir el colesterol y evitar enfermedades cardíacas, es posible que quienes corren el riesgo de padecer alzhéimer tomen píldoras para mantener la enfermedad lejos.

Se va a investigar un fármaco que elimina una proteína intrusiva llamada amiloide, de la que se sospecha que es un contribuyente principal al alzhéimer. Hasta hace poco, las acumulaciones de amiloide solamente podían verse al diseccionar el cerebro después del fallecimiento. Sin embargo, la aplicación de la tomografía avanzada por emisión de positrones a los cerebros de personas vivas, una innovación reciente, muestra que para cuando aparecen los síntomas la proteína amiloide lleva acumulándose de forma silenciosa desde hace veinte años incluso. Tal vez para entonces el cerebro ha sufrido ya daños irreversibles, de modo que cualquier fármaco será inútil. Sin embargo, nadie sabe a ciencia cierta si la amiloide ocasiona el alzhéimer o si solo es un producto de la enfermedad. El nuevo estudio quizá resuelva este misterio.

Lista para iniciarse a principios de 2013, si se conceden todas las aprobaciones, la investigación va a estudiar a trescientos miembros de unas familias colombianas lejanamente emparentadas, cuya rara y particularmente devastadora forma de alzhéimer los golpea en la plenitud de la vida. Hacia sus cincuenta y tantos o sesenta y tantos años de edad, muchos son tan indefensos como un bebé. Normalmente, es imposible predecir quién desarrollará

Purificación del agua con aceite

Un sencillo artificio químico depuraría las aguas residuales con un coste mucho menor

ANURAG BAJPAYEE buscaba un procedimiento mejor para conservar células humanas por medio de la congelación profunda. En esta forma de criogenia debe evitarse la formación de cristales de hielo que desgarren las células y las maten. En 2008, mientras experimentaba en el Hospital General de Massachusetts, Bajpayee le añadió aceite de soja al glicerol anticongelante que le aplicaba a las células; así elevaba la concentración de glicerol. Un año después, durante la evaluación de la tesis doctoral en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, entabló una curiosa conversación con los miembros del tribunal cuando describía el efecto del aceite de soja. ¿No podría valer para purificar el agua?, le apuntaron. Dice Bajpayee que esa ha sido una de las raras ocasiones en que un examen de doctorado ha dado lugar a una solicitud de patente.

Bajpayee no tardó en crear un sencillo procedimiento en el que un tipo poco corriente de aceites elimina los contaminantes del agua. Podría ser muy útil para ciudades, industrias y explotaciones agrícolas, que producen aguas sucias en gran cantidad: su depuración resultaría mucho más económica y gastaría menos energía.

El aceite de soja figura entre los pocos aceites que parecen servir como disolventes de tipo direccional. Es decir, disuelven el agua sin disolver las moléculas presentes en ella, las sales, por ejemplo. Calentado por encima de los 40 grados Celsius, el aceite de soja absorbe el agua pero no las moléculas contaminantes, a las que entonces es posible retirar. Basta con enfriar la mezcla para que el agua purificada se desprenda del aceite y se pueda recoger. El disolvente permanece inalterado, en condiciones de depurar más agua.

La clave reside en las propiedades químicas de los principales componentes de ese aceite: ácidos grasos. En su mayor parte rechazan el agua, pero en un extremo contienen un grupo carboxilo, que crea fácilmente un enlace de hidrógeno con el agua.

Que el proceso funcione sorprendió a Jean-Claude Bradley, químico de la Universidad Drexel; el fenómeno, dice, podría haberse descubierto un siglo antes. «Es lo mejor que he visto en química desde hace mucho.»

Los experimentos de Bajpayee demostraron, sin embargo, que para purificar un simple vaso de agua se necesitaba una piscina llena de aceite de soja. Buscó, pues, otro disolvente direccional que fuese más eficaz, y acabó por centrarse en el ácido decanoico, presente de modo natural en la leche y que se une con el agua aún más fácilmente. Este ácido graso podría convertir el agua de mar en agua dulce, pero da resultados óptimos con aguas más salobres, como las residuales de minería o las cargadas de sustancias que salen de los pozos petrolíferos y de gas, e incluso con las que proceden de la fracturación hidráulica (*fracking*). Como explica Bajpayee, la salinidad de esas aguas puede multiplicar por ocho la del mar, y en EE.UU. la extracción de gas y petróleo produce a diario más de nueve mil millones de litros de agua contaminada.

Animado por los resultados, Bajpayee está ensayando el ácido decanoico con seis muestras salobres tomadas de diferentes partes de EE.UU. El tratamiento habitual de estas aguas residuales recurre a la ósmosis inversa, que emplea membranas especiales que se obstruyen y ensucian con facilidad; a la destilación, que consume gran cantidad de energía; y las más de las veces, a inyectar el agua en un pozo profundo. Bajpayee también tendrá que idear una manera de procesar rápidamente y de manera continua el agua residual, en vez de hacerlo con cubetas y tubos de ensayo.

Para que el procedimiento tenga una repercusión real en la perforación de gases y crudo, Bajpayee admite que será preciso que cueste menos que la alternativa más económica, que en este momento es inyectar el agua en pozos profundos. Sin embargo, cada vez hay más sitios donde no se quiere que las aguas residuales acaben en el subsuelo y se pierdan. Y entre tanto, investigaciones ulteriores aclararán si el aceite decanoico u otros disolventes direccionales purificarían las aguas residuales o desalarían el agua de mar más económicamente que los métodos actuales; si fuera así, el tratamiento de las aguas tomaría una nueva orientación.

—*David Biello*

alzhéimer, pero en esta familia extendida una sola mutación genética, detectable mediante un análisis de sangre, es sinónimo de fatalidad.

Eric Reiman, director ejecutivo del Instituto Banner del Alzhéimer, en Phoenix, su colega Pierre Tariot y su colaborador colombiano Francisco Lopera comprendieron que esta familia proporcionaba una oportunidad única para comprobar los beneficios de la intervención temprana. Planean administrar un fármaco experimental, el crenezumab, a cien miembros de la familia que están a punto de desarrollar los síntomas del alzhéimer y un placebo a otros cien. Un tercer grupo, que no está destinado a contraer la enfermedad, también recibirá el placebo.

Los participantes recibirán inyecciones quincenales durante al menos cinco años. Cada pocos meses se les someterá a extensas pruebas: resonancia magnética para el seguimiento de la mengua cerebral, punciones lumbares para medir la proteína tau, que está asociada a la muerte de las células cerebrales, y pruebas de memoria y de pensamiento diseñadas para recoger sutiles deslices cognitivos, como olvidar una lista de palabras que se ha memorizado solo unos minutos u horas antes, un marcador de la enfermedad de Alzheimer incipiente.

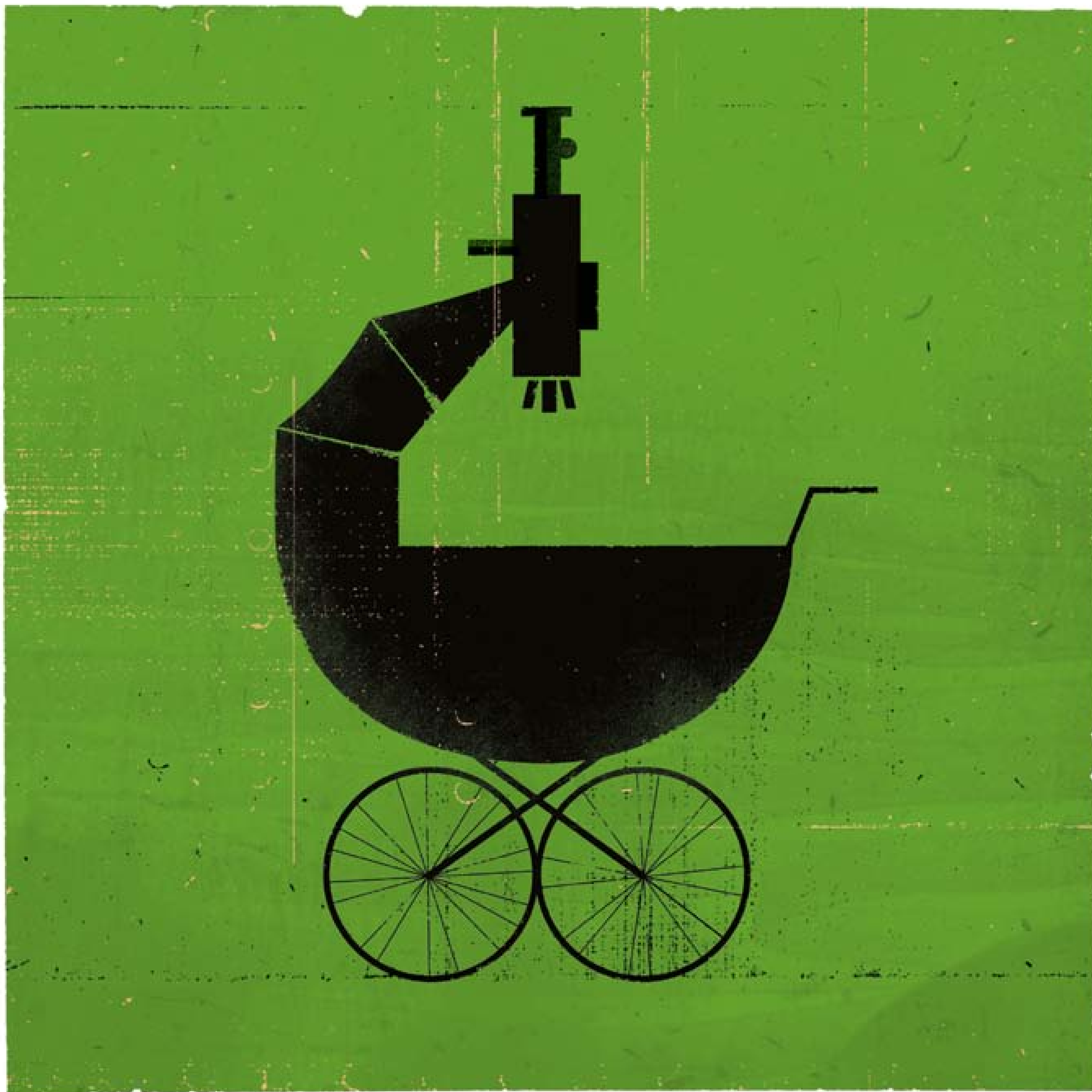
El estudio también reclutará tres docenas de pacientes de los EE.UU. Los estadounidenses, que también recibirán el mismo tratamiento, formarán un conjunto menos homogéneo, con varias mutaciones en cualquiera de los tres genes ligados al inicio temprano del alzhéimer. Los investigadores esperan descubrir si es posible extrapolar lo que corresponda a la familia colombiana a otros que estén destinados a desarrollar demencia a mediana edad.

El estudio, con un coste de 100 millones de dólares, está financiado por el fabricante del medicamento, Genentech, así como por filántropos y por los Institutos Nacionales de Salud de los Estados Unidos. Incluso si el medicamento tiene éxito, no hay garantía de que los resultados sean trasladables a la forma mucho más común de alzhéimer, que afecta a personas de mayor edad. Sin embargo, se espera que este ensayo establezca para el alzhéimer lo que el colesterol y la presión arterial elevada son para la enfermedad cardiovascular: signos intermedios que ayudan a la investigación, el diagnóstico y el tratamiento.

Los datos que recojan podrían significar que, en lugar de tener que esperar años para ver si un medicamento experimental ayuda a los pacientes, se podrían calibrar con rapidez los resultados de cambios biológicos sutiles, como un menor tamaño del cerebro o una alteración de los depósitos de tau o amiloide. «Necesitamos desarrollar modos más rápidos de poner a prueba la gama de tratamientos prometedores y encontrar algunos que funcionen lo antes posible», dice Reiman.

—Emily Laber-Warren





Un índice de sostenibilidad definitivo

Un nuevo sistema de valoración aprovecha la presión de las grandes empresas para depurar todas las etapas de la cadena de suministro

¿En qué grado son «sostenibles» una lata de refresco o un frasco de champú? Cada vez hay más consumidores que desean basar sus compras en la respuesta a esa pregunta, pero es difícil encontrar un sistema que calibre la repercusión negativa en nuestro planeta de la fabricación de un determinado producto. Son multitud los «índices de sostenibilidad» que escudriñan las distintas fases de la cadena de suministro o sus efectos sobre el ambiente (la cantidad de residuos de vertedero o las emisiones de dióxido de carbono que generan); y además usan escalas de medida establecidas por grupos diferentes. El problema no es la falta de información, sino su exceso.

Se facilitaría mucho la valoración de los productos si hubiera un solo conjunto de escalas de medida que evaluase los costes ambientales y sociales. Esta es la idea impulsora del Consorcio de la Sostenibilidad, una agrupación de diez universidades importantes, de grandes organizaciones sin ánimo de lucro y de ochenta compañías internacionales (entre ellas, Walmart, Coca-Cola y Disney), que han acordado que se cree un índice estándar que abarque la cadena de suministro entera. El grupo desveló en fecha reciente las medidas que utilizarán sus miembros para evaluar un primer conjunto de cien productos, en el que habrá desde cereales para el desayuno y detergentes hasta televisores.

Los defensores de la idea, como Jeff Rice, director de sostenibilidad de Walmart, argumentan que la aplicación de criterios de sostenibilidad a lo largo de la cadena de suministro no solo purificaría el entorno, sino que además recortaría los costes, al reducir, por

Secuenciación del genoma de los fetos

Un procedimiento no invasivo podría detectar miles de dolencias que hoy no se pueden discernir

SE HA DEMOSTRADO recientemente que para obtener el retrato genético de un feto (su genoma entero) basta con una muestra de sangre de la madre. El procedimiento podría revolucionar el cribado genético al revelar trastornos monogénicos (que dependen de un solo gen), tales como la fibrosis quística, la enfermedad de Tay-Sachs o el síndrome del X frágil, mucho antes de que el feto nazca, con lo que a los médicos les daría tiempo a aplicar posibles tratamientos prenatales y a las familias a prepararse para las necesidades de su hijo.

El uno por ciento de la población vive con un trastorno monogénico. Desde 2011 se puede determinar, a partir de muestras de sangre de la madre, si el feto tiene un cromosoma anormal, lo que señalaría, por ejemplo, un síndrome de Down. Sin embargo, con ese nivel de información no se descubren la mayoría de los cerca de 3500 trastornos monogénicos que hay. Los médicos pueden extraer tejido de la placenta o una muestra de líquido amniótico para detectarlos, pero estas exploraciones invasivas suponen un riesgo de aborto que la mayoría de las mujeres no están dispuestas a correr.

El nuevo método no invasivo daría a las madres un detalle sin precedentes sobre su hijo sin poner en peligro el embarazo. También podría llegar a más mujeres de todo el mundo, pues el procedimiento no requiere un tocólogo cualificado. Algunos investigadores imaginan equipos de «hágalo usted mismo» que las madres remitirían al laboratorio.

El procedimiento deriva de un descubrimiento realizado en 1997, cuando el patólogo químico Dennis Lo, entonces en la Universidad de Oxford, y sus colaboradores detectaron la presencia de ADN fetal en el plasma sanguíneo de una mujer embarazada. Ello significaba que era posible separar los dos tipos de ADN y usar la parte correspondiente al feto para obtener su genoma completo. Los investigadores buscaron haplotipos, grupos de secuencias génicas adyacentes. Diferentes métodos de búsqueda podían distinguir la variedad de haplotipos en una muestra de plasma e indicar cuáles venían de la madre o del feto. Era posible entonces volver a ensamblar los haplotipos en un genoma completo.

Era más fácil contar el procedimiento que hacerlo: requería una tecnología compleja que en la práctica solo ha estado disponible en tiempos recientes. En 2011, el genetista Jay Shendure, de la Universidad de Washington, desarrolló una técnica en la que se secuenciaban los genomas paterno y materno completos a partir de la saliva del padre y de la sangre de la madre; esa información la usaba para distinguir entre los haplotipos maternos y los fetales en el plasma de la madre. Con este proceso, Shendure puede discernir las mutaciones que aparecen de forma espontánea en el feto. Podría ayudar en la detección de trastornos raros.

Un grupo de científicos dirigido por Stephen Quake, bioingeniero de la Universidad Stanford, ha reconstruido el genoma fetal utilizando solo una muestra sanguínea de la madre. En primer lugar, buscan haplotipos que el feto hereda de la madre, probablemente los más frecuentes en el plasma porque la madre y el niño los comparten. A continuación, usan marcadores genéticos de la madre para identificar el resto del genoma materno. Los haplotipos que no aparezcan en el genoma de la madre serán exclusivos del feto y procederán del padre o de una mutación.

A pesar del progreso sigue habiendo problemas que resolver, en particular reducir el coste y mejorar la precisión de la secuenciación. Pero el mayor es interpretar el genoma. «Nuestra capacidad de detectar cambios genómicos ha superado a la de relacionarlos con enfermedades y características humanas», dice Brenda Finucane, presidenta de la Sociedad Nacional de Consejeros Genéticos. Muchos médicos creen que es prematuro adoptar los cribados antes de que se establezcan directrices claras para su uso.

Los críticos temen también que el procedimiento pueda dar lugar a abortos si los padres descubren que el feto tiene una enfermedad incurable. Sin embargo, médicos como Diana Bianchi, de la Universidad Tufts, piensan que los beneficios sobrepujarían a los temores, particularmente si gracias al cribado pueden realizarse tratamientos prenatales que corrijan enfermedades discapacitantes.

—Daisy Yuhas

ejemplo, el volumen de residuos. Walmart está incorporando esta nueva escala de medición en unas «tarjetas de puntuación» que ha distribuido entre alrededor de cuatrocientos de los compradores que adquieren para esta cadena de grandes almacenes los productos que vende. Se establecerán planes para reducir los impactos ambientales de común acuerdo entre estos compradores y los proveedores; y en sus informes los compradores analizarán la actuación de los proveedores.

Dell, miembro también del consorcio, les está pidiendo ya a los fabricantes de sus pantallas LCD que vean la forma de reducir la emisión de perfluorocarbonos (potentes gases de invernadero). Según Scott O'Connell, director de asuntos ambientales de Dell, los datos del consorcio les han servido de guía para saber en qué deben centrar sus trabajos.

El consorcio cree que su índice de valoración remplazará al fin a los otros sistemas. Un consumidor puede ya escanear en una tienda con su teléfono móvil el código de barras de un frasco de champú y obtener una clasificación de sostenibilidad compilada por GoodGuide. Esta herramienta en línea, sin embargo, se basa en informaciones de dominio público. Las puntuaciones asignadas por el consorcio tendrán en cuenta datos, hasta ahora guardados a buen recaudo, relativos a las emisiones, los residuos, las condiciones laborales, el uso del agua y otros factores vidriosos, y de los que se dispondrá solo cuando las grandes compañías presionen a los proveedores para que los entreguen. Con datos así, el índice debería ser más completo que los ya existentes. Empresas del tamaño de Wal-Mart, Best Buy y Dell controlan cientos de miles de millones de dólares de gasto de los proveedores: nada antes ha podido contribuir tanto a que la sostenibilidad se convierta en una preocupación común, afirma Rice.

Tendrán que pasar varios años para que a los consumidores se les permita consultar los datos del índice. Los dirigentes del consorcio prevén que los pondrán a disposición de los consumidores, pero todavía no han determinado de qué manera se podrá acceder a ellos. Mientras tanto, el índice podría estimular la innovación. Unos investigadores de la Universidad de California en Berkeley han redactado un informe para el consorcio en el que se pasa revista a las ventajas de utilizar en los ordenadores portátiles materiales de origen biológico en vez de plásticos. Y en la Universidad de Arkansas se están estudiando los mejores procedimientos para evaluar la repercusión ambiental de diversas técnicas agrícolas cuando el agua escasea.

—Adam Piore

Minería de la realidad

El caudal de datos que puede extraerse de los teléfonos inteligentes podría cambiar nuestra vida, siempre que lo permitamos

El sueño, tal vez la pesadilla, de sufrir una vigilancia casi incesante empieza a cambiar nuestra vida de maneras que pocos podíamos imaginar. Hoy, las empresas que analizan los datos de localización emitidos por nuestros teléfonos móviles pueden predecir con bastante precisión dónde vamos a encontrarnos en cualquier momento de la jornada. El registro de las llamadas telefónicas les permite saber también quiénes son nuestros amigos, familiares y compañeros, cuándo es probable que cojamos la gripe y cuál es la estructura demográfica en los principales lugares de una ciudad a cualquier hora.

La clave de esa explosión de datos es la penetración de los teléfonos inteligentes. Casi todos estos dispositivos envían constantemente a sus servidores centralizados, por defecto, un flujo de datos de localización, pues solo unos pocos usuarios se preocupan de anular esa recogida de datos, o ni siquiera saben que pueden hacerlo. Los científicos y los analistas comerciales se esfuerzan por cartografiar, a partir de una inmensa maraña de coordenadas, los movimientos de millones de personas.

Ese extraer información de la realidad (*reality mining*), un clásico problema de «sobreabundancia de datos», está aún en sus inicios. Hay compañías de telefonía móvil que ahora empiezan a vender datos a los analistas de mercado. A los investigadores solo les facilitan conjuntos de datos restringidos a los que se ha impuesto el anonimato para preservar la privacidad. Las tres mayores potencias en este campo (Google, Apple y Skyhook, de Boston, uno de los proveedores originales del servicio de geolocalización), andan con pies de plomo al manejar esa información ante el temor de que se les den usos intrusivos que provoquen el rechazo de los usuarios.

Entre las ventajas posibles para todos cabe mencionar la disminución de la publicidad irritante y la contención de brotes de epidemias. No obstante, los pocos usuarios enterados expresan sus temores. «El asunto da terror, es como el fuego de Prometeo», dice Alex *Sandy* Pentland, que acuñó la expresión *reality mining* a mediados de los 2000,



cuando junto con sus alumnos fue de los primeros en analizar los datos de localización emitidos por los teléfonos inteligentes.

Actualmente, firmas como Skyhook y PlaceIQ, de Nueva York, que recopilan datos de una forma que les sea útil a quienes quieren vender en algún mercado, ponen mucho cuidado en que no quede en ellos nada relativo a la localización de dispositivos individuales. Google asegura que destruye casi todos los datos de localización al cabo de una semana. Apple cometió el error de almacenarlos en el propio iPhone; ya lo ha corregido, pero no se muestra muy dispuesta a aclarar cómo almacena de modo centralizado toda la información y qué piensa hacer con ella.

Si se calman las preocupaciones relativas a la privacidad que están frenando un mayor uso de los datos, la «minería de la realidad» podría convertirse en esencial para guiarnos en nuestra vida diaria, y, desde luego, sería de extrema utilidad para grandes empresas y Gobiernos. En Haití permitió que las ONG enviasen mensajes de texto a los usuarios de telefonía móvil cuyos datos de localización indicaban que habían estado expuestos al cólera.

Para que extraer datos de la realidad adquiera verdadera importancia, los usuarios deberán autorizar la utilización de algo más que sus datos. Esta fue una de las razones por las que Pentland promovió los debates que condujeron en EE.UU. a la Carta de Derechos de la Privacidad de los Usuarios, así como a actualizar la Directiva de Protección de Datos de la Unión Europea. Si los usuarios tuviesen la impresión de que son ellos mismos quienes controlan sus datos, sería más probable que permitiesen que empresas, Gobiernos y particulares tuvieran acceso selectivo a la información a fin de mejorar sus servicios. Según Ted Morgan, director ejecutivo de Skyhook, «no hay sector de la sociedad que no vaya a utilizar esos datos, lo que cambia radicalmente nuestra forma de ver el comportamiento humano».

Se ha descubierto ya que las personas más proclives a pulsar los anuncios en el teléfono inteligente —y, por tanto, las más rentables para los anunciantes— son quienes se sientan en el cine antes de que empiece la película, quienes se quedan en casa los domingos por la mañana y los pescadores que esperan a que el pez pique el anzuelo. (PlaceIQ sospecha que un individuo pesca cuando sus coordenadas lo ubican en mitad de un lago y pertenece a un perfil demográfico concreto.)

Pentland cree que extraer información de la realidad, una vez se cuente con datos suficientes, mejorará la sanidad pública, el transporte y el suministro eléctrico, y que eso será solo el principio. Le gusta, dice, esta idea de un sistema nervioso de la sociedad. «Por fin la humanidad podrá percibir lo que la humanidad hace.»

—Christopher Mims

Marcapasos alimentados con azúcar

La glucosa de la sangre podría ser el combustible de los implantes médicos

MARCAPASOS, bombas de insulina y otros dispositivos médicos del futuro podrían funcionar sin pilas, impulsados por la misma energía que alimenta al cuerpo: el azúcar. Se empezó a soñar con implantes impulsados por glucosa en los años sesenta, pero la llegada de las pilas de litio a finales de los setenta proporcionó una solución más sencilla y más potente. Sin embargo, las pilas siempre han tenido un gran inconveniente: deben reemplazarse de forma quirúrgica y, en los marcapasos, duran entre 5 y 15 años. Las recargables se conectan a dispositivos electrónicos instalados fuera del cuerpo con cables que perforan la piel y exponen al paciente a infecciones.

Varios avances han reavivado el interés por la glucosa. Que los circuitos de los implantes sean más eficientes ha reducido la necesidad de potencia; por otra parte, las pilas de combustible biológico de glucosa se están volviendo mucho más eficientes y menos perjudiciales para el cuerpo.

En la mayoría de las pilas de combustible biológico, las enzimas del ánodo arrancan electrones a las moléculas de glucosa. Los electrones proporcionan la corriente al fluir hacia el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno y forman solo pequeñas cantidades de agua. Sin embargo, a diferencia de las baterías, las pilas de combustible han de estar inmersas en un suministro constante de combustible, que la sangre o el líquido intersticial proporcionan fácilmente.

El interés aumentó en 2003, cuando se construyó en la Universidad de Texas en Austin una pequeña pila de combustible biológico que generaba energía a partir de una uva. Varios grupos han presentado después dispositivos prácticos. Los modelos anteriores exigían condiciones ácidas que no se encuentran en el cuerpo, pero en la Universidad Joseph Fourier de Grenoble envasaron enzimas biocompatibles sobre una base de grafito, con lo que obtuvieron unos procesos químicos menos agresivos. Su pila, con forma de disco, es un poco más delgada que una moneda de un céntimo de euro y su diámetro, apenas mayor que la mitad del de esta. Va envuelta en el mismo material de las bolsas de diálisis, que permite que entren las pequeñas moléculas de glucosa y evita que salgan las enzimas. En un experimento realizado en 2010 con ratas, el dispositivo atrajo la glucosa del líquido intersticial y produjo una potencia estable de salida de 1,8 microvatios durante 11 días.

En 2012, el Instituto de Tecnología de Massachusetts dio otro paso hacia la comercialización. El ingeniero Rahul Sarpeshkar construyó una pila de combustible en forma de circuito integrado en un chip de silicio; se valió del mismo sencillo proceso de fabricación de los semiconductores. Su equipo quiere usar el líquido cefalorraquídeo para alimentar las interfaces cerebro-máquina. El líquido, que le sirve de colchón al cerebro y a la médula espinal, contiene gran cantidad de glucosa y pocas células del sistema inmunitario que puedan rechazar el implante.

Sarpeshkar ha preparado unos electrodos de platino que no irritan los tejidos corporales ni se corroen, señala Sven Kerzenmacher, de la Universidad de Friburgo, que también utiliza este material en sus diseños. Sin embargo, el cuerpo puede montar una resistencia a tal incursión; según Kerzenmacher, la biocompatibilidad es el mayor obstáculo. Su prototipo funciona bien en soluciones tampón en el laboratorio, pero, en las pruebas con líquidos corporales, los aminoácidos de la sangre o el suero reducen la potencia del dispositivo.

Aunque un grupo de la Universidad Clarkson ha implantado una pila de biocombustible en un caracol, el de Grenoble sigue siendo el único que ha logrado que una pila de combustible de glucosa funcione en un vertebrado. El diseño del MIT no se ha probado en el líquido cefalorraquídeo, sino en un tampón que se aproxima a los líquidos del cuerpo. Sin embargo, Sarpeshkar es optimista: cree que las pilas de combustible biológico saldrán al mercado en diez años. Su dispositivo de silicio produce una potencia fiable de 3,4 microvatios por centímetro cuadrado. Los marcapasos actuales necesitan de 8 a 10 microvatios, una meta factible. Los implantes cocleares necesitan unos pocos milivatios y los órganos artificiales, aún más.

El progreso de los implantes alimentados con azúcar facilitará la miniaturización de los dispositivos médicos. Tal vez un día, unos robots nanométricos que funcionen con glucosa y dispensen fármacos en un blanco elegido atraviesen la barrera entre la ciencia ficción y la realidad.

—Marissa Fessenden

Espías de uso doméstico

Un diminuto avión no tripulado podría informarnos sobre el tráfico o espiarnos en nuestro propio jardín

Los ojos que nos escudriñan desde el cielo ya están modificando el desarrollo de la ciencia y el curso de las guerras. Una flota comercial de tales espías, los «vehículos aéreos no tripulados» (VANT, también llamados *drones* o zánganos), va a cambiar radicalmente nuestra manera de vivir.

Científicos como Lian Pin Koh, del Instituto Federal de Tecnología de Suiza, y Serge Wich, de la Universidad John Moores de Liverpool, contribuyen a crear ese fascinante y quizas inquietante futuro. Tras haber gastado 250.000 dólares en seguir a pie durante dos años y medio huellas de orangutanes en Sumatra, idearon un procedimiento más cómodo y barato: adquirieron un aeromodelo alimentado por una batería y le añadieron un económico sistema de piloto automático de código abierto y una cámara de alta resolución. Por menos de 2000 dólares construyeron el «*dron* de la conservación»: un avión autónomo de 1,4 metros de envergadura que, guiado por señales GPS, vuela por rutas preprogramadas para obtener imágenes y datos bastante detallados sobre las guaridas de orangutanes y las nuevas zonas de deforestación. «Todavía nos sorprende lo fácil que fue ensamblarlo con componentes que se pueden comprar en una tienda», explica Koh.

Ante el éxito, a principios de 2012, de los primeros ensayos, otros conservacionistas se han apresurado a encargar sus propios aviones. En colaboración con una empresa suiza de nueva creación, Koh y Wich han construido ya más de 20 aparatos.

Las Fuerzas Armadas estadounidenses recurren ya a VANT de gran tamaño, como el Predator, para combatir al enemigo, y a pequeños aviones y helicópteros autónomos para el reconocimiento de las rutas de los convoyes o para descubrir emboscadas. Además, se persiguen con ellos las actividades ilegales en la frontera de EE.UU. con México. Pero también intervienen ciudadanos entusiastas; los hay que han construido *drones* especializados en pillar a quienes contaminan, inspeccionar plataformas de perforación

Tatuajes electrónicos

Es posible equipar envases, accesorios e incluso nuestro propio cuerpo con sensores ultrafinos y flexibles

SE HAN CONSTRUIDO YA circuitos integrados sobre plásticos flexibles, pero la electrónica no tardará mucho en llegar a unos terrenos mucho más maleables: habrá circuitos que se adherirán al cuerpo, como tatuajes, para vigilar las constantes vitales; o se entretejerán en la ropa para hacer de batería de un teléfono inteligente, o se incorporarán a los envases de alimentos para advertirnos en caso de que se hayan contaminado.

John Rogers, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, no se empeñó en buscar sustancias flexibles conductoras de electricidad: hizo que los circuitos de silicio ordinarios se pudiesen doblar. Con los ingenieros de la empresa mc10, de Cambridge, Massachusetts, lijó los microchips de silicio por medio de procesos de fabricación comunes de modo que su grosor, que por lo común es de unos milímetros, se redujese a solo 10 o 20 micrómetros. Crearon asimismo hilos sumamente delgados para conectar estos chips entre sí y con puertos de entrada y salida tradicionales. Estos hilos se podían doblar, plegar y estirar hasta el doble de su dimensión original.

Kevin Dowling, vicepresidente de investigación y desarrollo de mc10, compara esta configuración con islas (los chips) ancladas en océanos de interconectores que se estiran y doblan. «El acero del que están hechos los *slinkies,* esos muelles metálicos que al doblarse y desdoblarse van de acá para allá, no es muy extensible», explica Dowling. «Pero el *slinky* puede alargarse hasta 40 o 50 veces su longitud original sin sobrepasar el límite plástico del acero. Podemos crear interconectores de metal o de silicio del mismo modo.»

Según Rogers —cofundador de mc10 y director del laboratorio donde, a todos los efectos, radica todo el I + D de la empresa—, de aquí a 5 o 10 años veremos dispositivos electrónicos extensibles en soportes tan finos como una tirita; vigilarán el cuerpo al que estén adheridos y transmitirán los resultados por vía inalámbrica. Ya tiene mc10 varios contratos para estos productos. Así, Reebok le ha encargado que le suministre monitores de la salud integrables en la ropa, y el Ejército de EE.UU. que determine si puede crear células solares flexibles para los uniformes y las mochilas de los soldados. En el pasado abril, Paulie Harraka, piloto de la NASCAR (Asociación Nacional de Carreras de Automóviles de Serie), probó durante una carrera un parche transparente fijado en la piel. Le medía el nivel de hidratación, dato importante cuando un piloto se recuece durante horas al volante. Otros ingenieros, como Nanshu Lu, de la Universidad de Texas en Austin, y un equipo de la Universidad de Corea en Seúl, persiguen también la realización de tatuajes biomédicos flexibles.

Los sensores semejantes a tiritas podrían quedar fijados al cuerpo toda una semana; servirían de «bioestampaciones» o tatuajes médicos que medirían el ritmo cardíaco o la sudoración. Los circuitos son finos y transparentes como pequeños fragmentos de película diáfana adheridos a la piel.

Algún día podrían insertarse circuitos así en el corazón o el cerebro. Rogers imagina enfundar un corazón afectado de arritmia en una bolsa artificial que detectaría y corregiría electrónicamente el ritmo anormal del órgano. Esa envoltura enviaría estimulaciones eléctricas variables a cualquier punto del corazón; de ese modo conformaría sus latidos con muchos más matices que un marcapasos. Rogers piensa también en la implantación de piel artificial en una quemadura para proporcionar vascularización artificial y, al mismo tiempo, administrar fármacos y estímulos que curen la lesión.

Si las técnicas de mc10 llegaran a realizarse a una escala mayor, cabría concebir un rollo de adhesivos, cada uno de ellos un sensor. Podría llenarse una habitación de minúsculas pegatinas que captasen el sonido. Todo lo que un chip de silicio detecte (esfuerzos, vibraciones, campos eléctricos), podría también medirse con pequeños sensores finos como una hoja de papel. Adheridos al cuerpo o a la ropa, utilizarían los mismos campos electromagnéticos débiles que los alimentaran para enviar información a través de los teléfonos móviles inteligentes.

Que el abanico de aplicaciones llegue a ser amplio dependerá de las innovaciones que introduzcan los fabricantes de electrónica que compren licencias de mc10. Como ha sucedido con otros importantes hallazgos (recordemos los diodos LED que iluminan de todo, de los escaparates a las viviendas), son los miles de fabricantes de dispositivos electrónicos de consumo quienes deberán imaginar las mejores aplicaciones de esta técnica que abre nuevos campos.

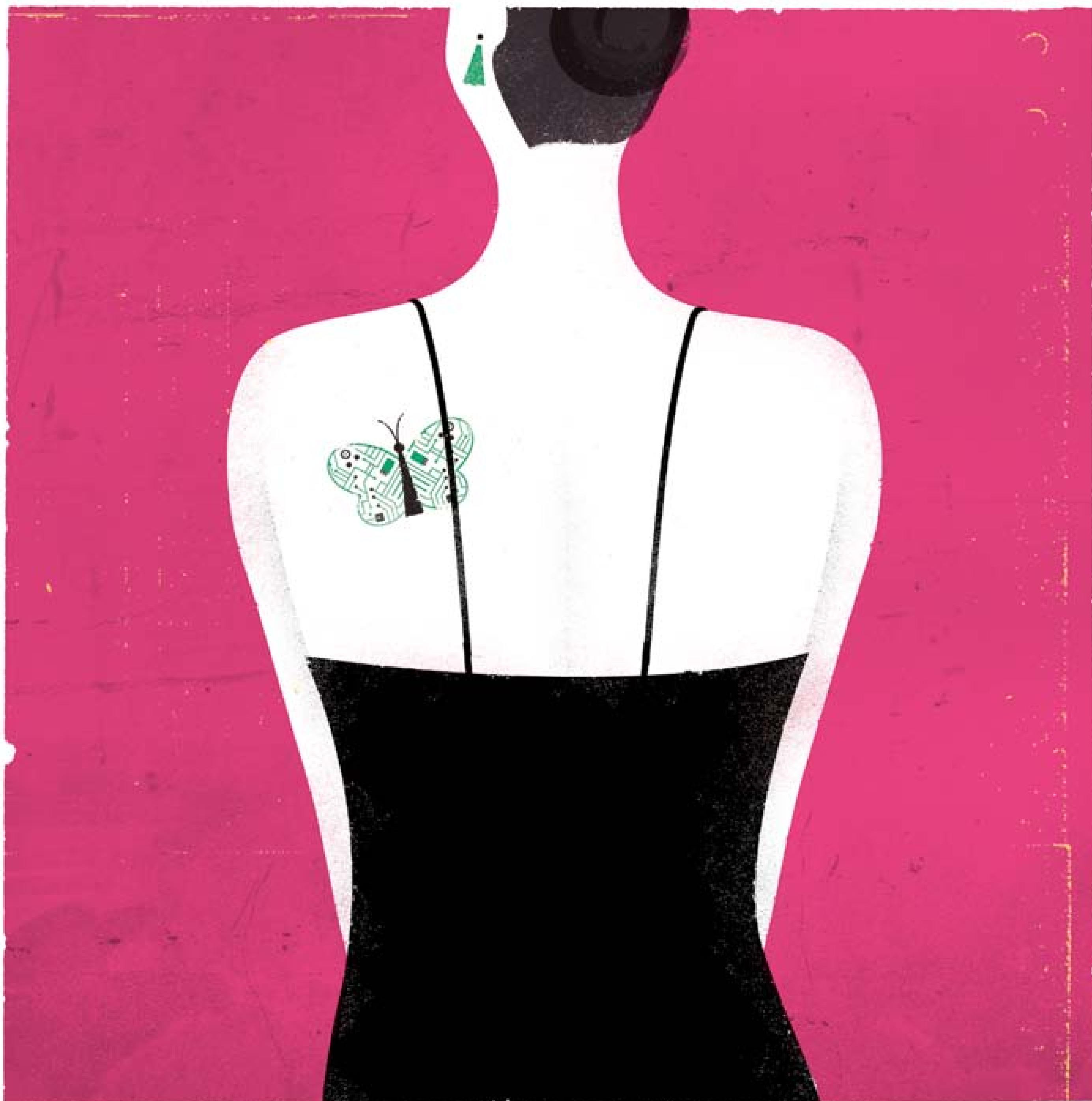
—Christopher Mims

u obtener buenas imágenes para el cine o los anuncios de fincas en venta. «Los VANT van a cambiar profundamente el mundo», proclama Matthew Waite, periodista convertido en profesor de la Universidad de Nebraska en Lincoln que explora el uso de estos vehículos en el periodismo.

Esta revolución responde a los rápidos avances de la técnica. Utilizando los potentes chips de los teléfonos inteligentes y plataformas de *hardware* de código abierto, como Arduino, los partidarios del «hágaselo usted mismo», entre ellos los miembros del colectivo DIY Drones (DIY son las siglas de «hágaselo usted mismo»), han empezado a construir pilotos automáticos, refinados aunque de bajo coste, que transforman en autónomos los aviones controlados por radio. Los fabricantes de VANT para uso militar tienen ahora productos pensados para los departamentos de policía y los organismos gubernamentales. El Departamento del Interior estadounidense cuenta ya con 60 aviones Raven, de algo más de 2 kilogramos de peso, suministrados por una empresa pionera del ramo, AeroVironment; sirven, por ejemplo, para observar el reposo de las grullas canadienses o medir las temperaturas de los ríos y sus flujos de sedimentos, entre otras tareas. Las posibilidades futuras parecen ilimitadas; equipados con refinadas cámaras y sensores, los pequeños espías podrían detectar que un cultivo necesita agua, cartografiar los vertidos de petróleo e informar de atascos de tráfico. «Estamos solo en la punta del iceberg de lo que es posible», proclama Mike Hutt, gerente de la Oficina Nacional de Proyectos de Sistemas de Aeronaves No Tripuladas del Servicio Geológico de EE.UU.

El iceberg tardará todavía algunos años en aflorar del todo, ya que la Administración Federal de la Aviación (FAA) de Estados Unidos prohíbe el uso comercial de VANT por temor a las confusiones y accidentes que podría haber si miles de vehículos no tripulados navegasen por un espacio aéreo ya bastante concurrido. En términos generales, la FAA autoriza los vuelos de aficionados, agencias estatales e investigadores, y suele limitar la altitud a unas decenas de metros. Pero la Ley de Modernización y Reforma de la FAA, firmada en febrero de 2012 por el presidente Barack Obama, exige que esta entidad desarrolle normas que permitan más aplicaciones civiles. Por ello, la FAA trabaja con las empresas en las tecnologías esenciales para que los *drones* puedan detectar y esquivar otros objetos voladores. Hacia 2015 se esperan las normas definitivas, lo que abriría las puertas a una explosión de las aplicaciones comerciales.

Waite sugiere que esta pausa actual es un verdadero regalo. «Los VANT plantean enormes dudas relativas a la seguridad, la ética, los derechos y la intimidad», afirma, «pero ahora tenemos la rara oportunidad de pensar en cómo vamos a utilizar una tecnología antes de utilizarla de verdad». *—John Carey*





Daniel Grushkin escribe sobre ciencia y tecnología en *Businessweek, Nature Medicine* y otras publicaciones. Es asimismo cofundador de Genspace, un laboratorio de la ciudad de Nueva York centrado en la educación e innovación biotecnológicas.

CONSERVACIÓN DEL ARTE

Los daguerrotipos evanescentes

Unas inestimables imágenes de los primeros días de la fotografía se desvanecían ante los propios ojos de los visitantes a un museo. Un insólito equipo se dispuso a salvarlas

Daniel Grushkin

A oscuras como en un teatro, los fantasmas en blanco y negro de próceres bostonianos nos miraban en el Centro Internacional de Fotografía de Nueva York tras los vidrios protectores, entre sus marcos de palisandro. Tomaron esos retratos en la Nueva Inglaterra de mediados del siglo xix Albert Sands Southworth y Josiah Johnson Hawes, los Rembrandt de la daguerrotipia, la primera forma viable de la fotografía. Una recatada novia vestida con crepé de seda blanca acariciaba sus cintas; el estadista Daniel Webster, altivo y severo, nos miraba fijamente desde detrás de sus cejas prominentes. El día de 2005 en que se inauguró la exposición «Joven América», en esas imágenes de hace siglo y medio se veía a personajes norteamericanos de una época en que el país estaba dejando atrás la adolescencia para convertirse en una potencia mundial. «Cada imagen brilla en la pared como la piedra de un anillo del humor», se entusiasmaba la reseña del *New York Times*.

Pero al cabo de un mes de exposición, aquellas imágenes sobre placas recubiertas de plata empezaron a degradarse. Unas nubes blancas se adueñaron de medio retrato de una dama vestida con una larga falda que parecía una cortina. Sobre el abolicionista Henry Ingersoll Bowditch se formaron halos iridiscentes. En otras imágenes aparecieron ampollas. Al final de los dos meses y medio que duró la exposición, había 25 daguerrotipos dañados, cinco de ellos de muy mala manera.

Tan brusco deterioro sembró el pánico en el pequeño mundo de la daguerrotipia. A diferencia de la fotografía, donde de un único negativo se puede sacar multitud de copias, cada daguerrotipo es único. Cuando la imagen se desvanece, está perdida para siempre. El debilitamiento de aquellas imágenes hacía pensar que todo daguerrotipo podría degradarse espontánea-

EN SÍNTESIS

Los conservadores al cuidado de una exposición de daguerrotipos de hace 150 años advirtieron que las imágenes se desvanecían ante sus propios ojos. Las luces de la exposición parecían estar blanqueándolos y nadie sabía por qué.

El conservador responsable de las imágenes formó equipo con un físico especialista en condensados de Bose-Einstein para investigar la química nanométrica que subyace al deterioro.

Los resultados de sus investigaciones afectan no solo al almacenamiento y exhibición de unas obras de arte del mayor valor, sino que además ilumina procesos físicos fundamentales que podrían aplicarse en la nanoingeniería.

CORTESÍA DE GEORGE EASTMAN HOUSE



Posado evanescente: El daguerrotipo de esta dama desconocida es una forma primitiva de fotografía. En 2005, al cabo de un mes de estar exhibido, unas manchas neblinosas empezaron a borrarlo (*arriba*).

mente. Los coleccionistas temieron por sus carísimas colecciones. Los conservadores de los museos se asustaron de que esas vistas del siglo XIX pudieran nublarse.

En aquel momento, ni los conservadores de arte ni los expertos en daguerrotipia tenían idea de cuál era la razón de lo que estaba ocurriendo. Aunque la mayoría de aquellas imágenes habían pasado su existencia en la oscuridad de los armarios del Museo Internacional de Fotografía y Cine de la Casa George Eastman, en Rochester (Nueva York), las ocasionales exhibiciones anteriores no parecían haberlas perjudicado. Pero esta vez, el mero hecho de mostrarlas parecía que las destruía. La Casa Eastman decidió retirar sus daguerrotipos de la exposición. El Museo Metropolitano de Arte de la Ciudad de Nueva York muestra ahora solo uno, pero tras una cortina. Y el Centro de Yale para el Arte Británico, que se había propuesto montar una gran exposición de daguerrotipos, la aplazó hasta que los conservadores descubriesen un método seguro de ofrecerlos a la vista.

El encargo recayó en Ralph Wiegandt, el conservador de la Casa Eastman que había diseñado la iluminación y las vitrinas de la exposición «Joven América». Wiegandt, un hombre amistoso, de pelo enmarañado y curioso como un niño travieso, se encontró así enfrentado a unas cuestiones de química que rebasaban sus habilidades como conservador. «Llevo casi 30 años en este oficio, pero este es un caso aparte», explicó. «Todo su secreto está en una o dos capas moleculares.» Dada la complejidad de la física de las superficies plateadas de los daguerrotipos, el problema requería una colaboración muy singular.

Wiegandt tuvo que asociarse con los físicos. En el curso de sus investigaciones sobre la causa del desvanecimiento de las imágenes, él y sus colaboradores descubrirían unos nuevos y sorprendentes efectos moleculares a escala nanométrica. Y así, las reliquias accidentales de una técnica de hace 150 años quizás inspiren a la ingeniería futura.

IMÁGENES FIJADAS

Nicholas Bigelow dirige el departamento de física de la Universidad de Rochester, situado justo en la calle que conduce a la Casa Eastman. Había tenido noticia de la exposición; en 2009 invitó a Wiegandt a que hablase sobre su singular problema en una reunión de físicos que se iba a celebrar en Rochester. La especialidad de Bigelow son los condensados de Bose-Einstein, nubes de átomos a temperaturas cercanas al cero absoluto, un estado cuántico abstracto en unas condiciones inimaginables. Sin embargo, la charla de Wiegandt lo cautivó. Le ofreció sus servicios; deseaba ayudar, dijo, en «algo que repercuta en la vertiente humana de la vida».

Los daguerrotipos, pensaba Bigelow, habían cambiado el modo en que percibimos el mundo. Louis-Jacques-Mandé Daguerre, pintor, escenógrafo y creador de espectáculos de dioramas parisino, inventó el procedimiento en 1839 tras buscar durante diez años un medio de fijar una imagen en una placa de plata. Un día, según se cuenta, se le rompió un termómetro y distraídamente lo metió en un armario con las placas de plata. Al día siguiente descubrió que los vapores del mercurio habían estabilizado la imagen. Acababa de descubrir la química de la toma de imágenes. «Lo que realmente tenía allí eran nanoestructuras autoensamblantes», afirma Bigelow. «Se lo propusiera o no, estaba haciendo nanoingeniería.»

Bigelow y Wiegandt tenían que reconstruir la nanoingeniería con la que se había topado un Daguerre que lo ignoraba todo al respecto, pero antes debían hacer un poco de macroingeniería. Un día de febrero inusualmente cálido, Wiegandt, Bigelow y Brian McIntyre, microscopista de la Universidad de Rochester, se arrodillaban sobre el piso del departamento de física para hurgar con el mango de un martillo en el interior de un microscopio electrónico. La esclusa de aire de la cámara de vacío se resistía y necesitaba un par de golpes. Cedió por fin. El ordenador mostraba un rectángulo de plata de unos centímetros de largo dentro de la cámara, un trozo de daguerrotipo que Wiegandt había comprado por 60 dólares en eBay y cortado a cuadros. En la superficie se veía media cara de un hombre de ojos sombreados. «Ya sé que corté en pedazos al caballero. Cargo con la responsabilidad», me contaba Wiegandt.

Bajo una ampliación de 32 aumentos, aquella cara comenzaba a parecerse a un mapa del siglo XIX: la corrosión en el cabello, una mancha de petróleo en el mar; las ampollas, un archipiélago. Bajo una ampliación de 20.000 aumentos, la superficie de plata se veía estriada, siguiendo la textura del pulido. Las zonas más claras, el blanco de los ojos por ejemplo, revelaban unas nanoestructuras ocultas que se parecían a diminutos montones de huevos blancos. Eran en realidad cristales uniformes de plata-mercurio, cuya distribución determina los blancos y grises de la imagen.

Hacer un daguerrotipo requiere tres pasos. Primero, el artista expone la plata a vapor de yodo o de bromo; ambos elementos, del grupo de los halógenos, son muy reactivos. El vapor se une a la plata para formar una superficie de halogenuro de plata uniformemente fotosensible. Cuando el fotógrafo expone la placa a la luz, los fotones expulsan los halógenos y dejan plata pura. En las zonas donde la imagen es oscura persiste el halogenuro. Seguidamente, se expone la placa a vapor de mercurio. Los átomos de este se unen a la plata pura y forman cristales de plata-mercurio. En un último paso, se lava la placa con tiosulfato de sodio (el «hipo» de los fotógrafos sobre película), que elimina el halógeno de la superficie de la placa y deja una superficie de plata pura moteada de cristales de plata-mercurio. La plata desnuda refleja en negro, y los cristales de plata-mercurio refractan la luz en blanco para crear un efecto fantasmagórico: la imagen irradia justo tras la superficie especular de la plata.

A causa de la intensa reactividad de la plata, los daguerrotipos siempre han sido propensos a deslustrarse. Los retratistas encerraban de inmediato las placas en fundas de vidrio para protegerlas. Este método pareció dar buen resultado durante 150 años, hasta que «Joven América» mostró que los daguerrotipos son sensibles incluso a la mera luz.

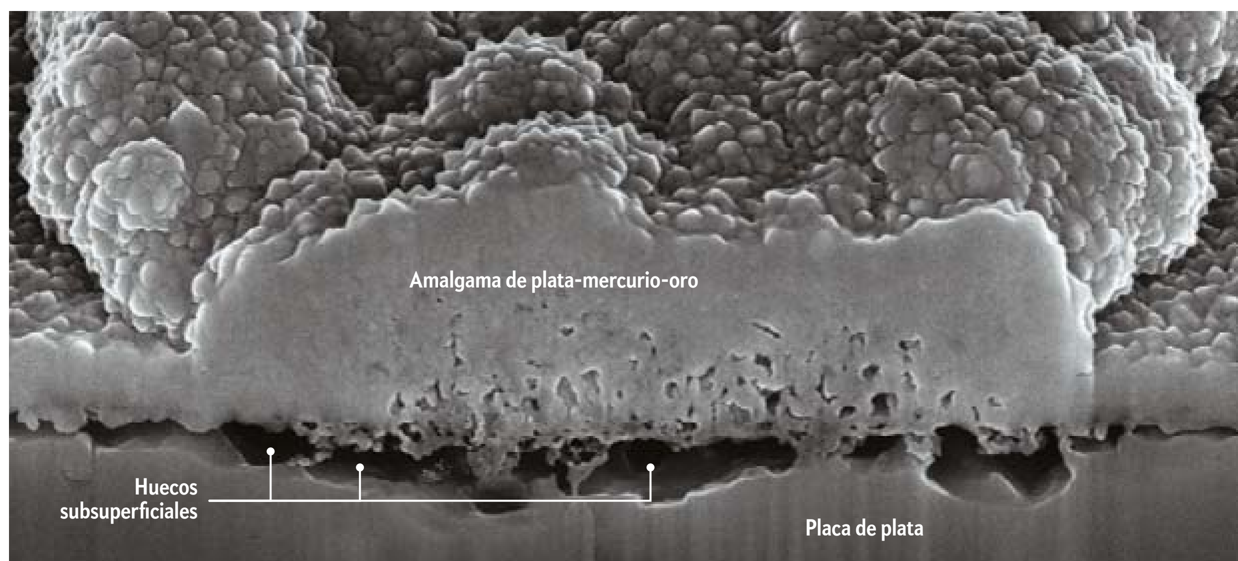
MANCHAS BRILLANTES

Wiegandt y Bigelow trabajaron en el problema junto con conservadores del Museo Metropolitano, que habían descubierto trazas de cloro en las blancas manchas de corrosión de las imágenes. Al haber estado expuestas al salino aire de Boston, las placas estaban permeadas de cloruros. El cloro es un halógeno, como el yodo, y reacciona con la plata. La luz de un foco apuntada en una exposición hacia un daguerrotipo podía reexponer la placa y crear cristales de cloruro de plata que nublaban la imagen.

Pero el aire marino no era el único culpable. Wiegandt y Patrick Ravines, hoy director del departamento de conservación de arte de la Universidad estatal de Nueva York en Buffalo, descubrieron que la integridad de los daguerrotipos también se socavaba desde debajo de la superficie de las placas. Valiéndose de un haz iónico concentrado, Wiegandt, en colaboración con investigadores de Kodak, abrió un rectángulo de 30 micrómetros de largo en la superficie de unos daguerrotipos de muestra. Se-

Problemas bajo la superficie

Esta sección transversal de un daguerrotipo muestra los diminutos huecos subsuperficiales que quizá sean la causa del deterioro. Cuando se revela un daguerrotipo, la plata de la placa subyacente se combina en su superficie con vapor de mercurio y oro. La teoría de los científicos es que el proceso arrastra plata a la superficie, lo que deja espacios huecos bajo la superficie. En el caso de la colección Southworth y Hawes, esos huecos podrían haber atrapado cloro del salino aire de Boston. La luz volvería a exponer el sensible cloruro de plata sensible así generado, y ello crearía las manchas neblinosas que deslucen la imagen.



guidamente examinaron las secciones transversales de las capas. Con sorpresa, vieron unos huecos de 300 nanómetros de ancho justo bajo la superficie, una red de túneles que discurrían inmediatamente por debajo de las imágenes.

El equipo cree que el origen de esas galerías se encuentra en el efecto Kirkendall, que se presenta habitualmente en las aleaciones metálicas. Cuando dos metales diferentes se difunden el uno con el otro a velocidades distintas, en su interficie se forman pequeños huecos o imperfecciones. Los huecos de los daguerrotipos tienen que haberse formado en su creación, cuando los cristales de plata-mercurio extrajeron plata de debajo de la superficie de la placa.

Esos huecos explicarían por qué se deterioraron algunos de los daguerrotipos de la muestra. A lo largo de 150 años, en las oquedades pudieron infiltrarse cloro u otros contaminantes. Al exhibirse las imágenes, puede que la luz provocase reacciones subsuperficiales entre el cloro y la plata, lo que hizo que en las imágenes aflorasen manchas desde el interior.

Los descubrimientos del equipo podrían resultar útiles también en otros ramos. Muchos investigadores persiguen la producción de partículas huecas uniformes para, por ejemplo, administrar fármacos. Bigelow cree que, si consiguen controlar el efecto Kirkendall para crear un hueco único y uniforme en una partícula de metal, cabría aplicar el procedimiento a la fabricación de nanocápsulas de uso médico.

FUNDAS HERMÉTICAS

Wiegandt no puede recuperar los daños ya ocasionados, pero sí emplear lo aprendido para proteger las demás imágenes de la colección Southworth y Hawes. En su laboratorio de la Casa Eastman ha construido prototipos de marcos de aluminio y pirex con una válvula que hermetiza las placas en una atmósfera de argón. Este gas noble protege los daguerrotipos frente al oxígeno y a los contaminantes atmosféricos que pudieran reaccionar con la superficie de plata. Afirma que el uso de materiales comerciales le ha permitido rebajar el coste de cada funda de argón a 50 dólares.

Actualmente está ocupado en la producción de fundas para toda la colección Southworth y Hawes. No significa que vaya a exhibirse de nuevo en público. «No sé si daría mi visto bueno para ello», aclara. Como alguien que se ha pasado los últimos siete años analizando y recopilando los modos que tiene el mundo de destruir las delicadas superficies de los daguerrotipos —de los fotones a los hongos—, Wiegandt se muestra, es comprensible, inquieto: «Los daguerrotipos, estén guardados o se los exhiba, deberían permanecer encerrados en una atmósfera de argón.»

Puede que los visitantes de los museos no se den cuenta de lo que los conservadores nunca olvidan: la vida de toda obra de arte, sea de pintura, piedra o plata, es limitada. Aun en las más perfectas condiciones museísticas, las imágenes se difuminan, la piedra se agrieta y de la plata se desprenden nanopartículas. Los conservadores no pueden salvarlas para siempre. «Los dos pilares de un museo son la conservación y el acceso», afirma Wiegandt. Rara vez habrán estado tan directamente reñidos.

PARA SABER MÁS

Young America: The daguerreotypes of Southworth and Hawes. **www.eastmanhouse. org/icp/pages/young_america.html**

Alex de Mendoza y **Arnau Sebé Pedrós** son doctorandos del Instituto de Biología Evolutiva del CSIC y la Universidad Pompeu Fabra (IBE-CSIC-UPF), y del departamento de genética de la Universidad de Barcelona.

Iñaki Ruiz Trillo es profesor de investigación ICREA en el IBE-CSIC-UPF y profesor asociado del departamento de genética de la Universidad de Barcelona. Sus trabajos se centran en los mecanismos genéticos de la transición a la multicelularidad.



EVOLUCIÓN

El origen de la multicelularidad

El estudio de los genomas de nuestros ancestros unicelulares sugiere una nueva hipótesis sobre la transición evolutiva que dio lugar a los organismos multicelulares

Alex de Mendoza, Arnau Sebé Pedrós e Iñaki Ruiz Trillo

«Cuando aparecieron los animales, el mundo cambió para siempre»

(Simon Conway Morris, *The crucible of Creation*)

Quizás el lector lo dé por sentado, pero el hecho de poder estar leyendo este artículo al mismo tiempo que respira, digiere el desayuno y se regeneran sus tejidos, no es algo trivial. De hecho, es el resultado de una de las transiciones evolutivas más importantes de la historia de la vida: la aparición de la multicelularidad. Esta división del trabajo celular constituye una capacidad exclusiva de los organismos multicelulares, ausente en los unicelulares. De entre todos los grupos de organismos que poseen más de una célula, en ninguno la multicelularidad exhibe el nivel de complejidad que observamos en los animales. Gracias a este progreso evolutivo, estos se diversificaron dando lugar a una fascinante variedad de formas corporales, actuales y extintas.

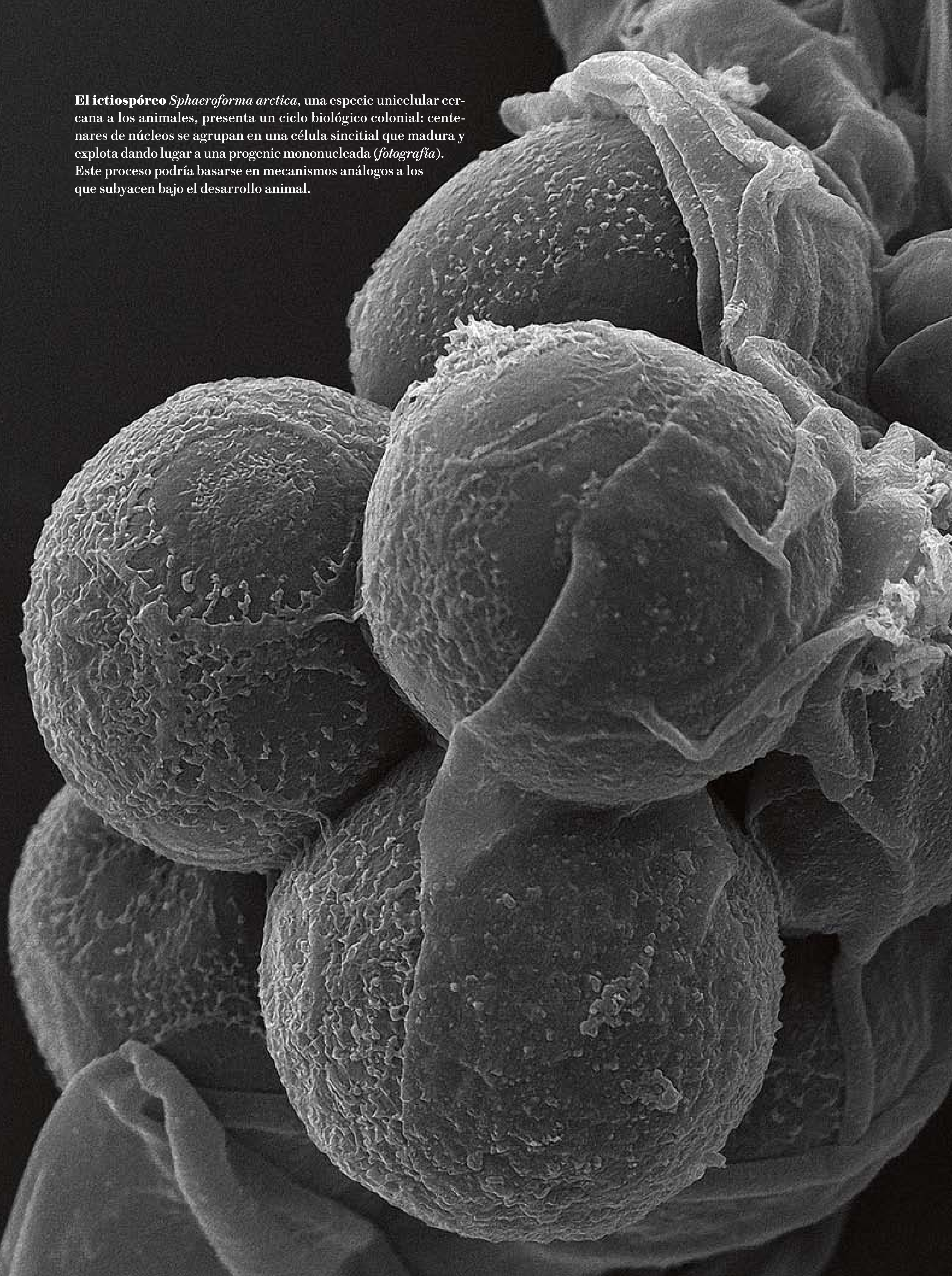
A pesar de la importancia de esa transición, poco se conoce sobre los mecanismos evolutivos, moleculares o ambos que permitieron la aparición de los animales a partir de sus ancestros unicelulares. Descifrar el modo en que pudo pasarse de un organismo unicelular al primer animal multicelular resulta vital para comprender el proceso de aparición de la multicelularidad, así como para ahondar en la evolución de las especies animales —incluida la nuestra— y averiguar el origen de muchos de los genes claves para el desarrollo animal.

EN SÍNTESIS

La transición de formas de vida unicelulares a multicelulares ha ocurrido en más de una ocasión a lo largo de la evolución. Las plantas, las algas marrones, los hongos y los animales han adquirido estilos de vida multicelulares de forma independiente y convergente.

La aparición de los animales representó un paso evolutivo clave en la historia de la vida. El desarrollo embrionario y todas las funciones que requiere la vida multicelular se hallan conservados en todos los animales, desde las esponjas a los humanos.

La secuenciación de los genomas de las especies unicelulares más cercanas a los animales ha revelado que estas ya contenían muchos de los genes necesarios para la multicelularidad. Estos habrían sido reutilizados para nuevas funciones multicelulares en el ancestro común de todos los animales.



El ictiospóreo *Sphaeroforma arctica*, una especie unicelular cercana a los animales, presenta un ciclo biológico colonial: centenares de núcleos se agrupan en una célula sincitial que madura y explota dando lugar a una progenie mononucleada (*fotografía*). Este proceso podría basarse en mecanismos análogos a los que subyacen bajo el desarrollo animal.

Hasta ahora, la mayoría de los estudios sobre el origen de los animales se han centrado en el análisis del registro fósil o bien en la comparación de la morfología y el genoma de diferentes animales. Ahora, un enfoque basado en la comparación genómica de nuestros parientes unicelulares más cercanos está arrojando nueva luz sobre esta cuestión. Si bien resulta sorprendente, estos ancestros contaban ya con buena parte de los genes implicados en la multicelularidad y el desarrollo animal. Dicho de otro modo, ya estaban genéticamente preparados para dar el gran salto. Asimismo, el estudio de estos organismos también ha permitido desentrañar los principales procesos moleculares que hicieron posible esta transformación evolutiva.

PROS Y CONTRAS

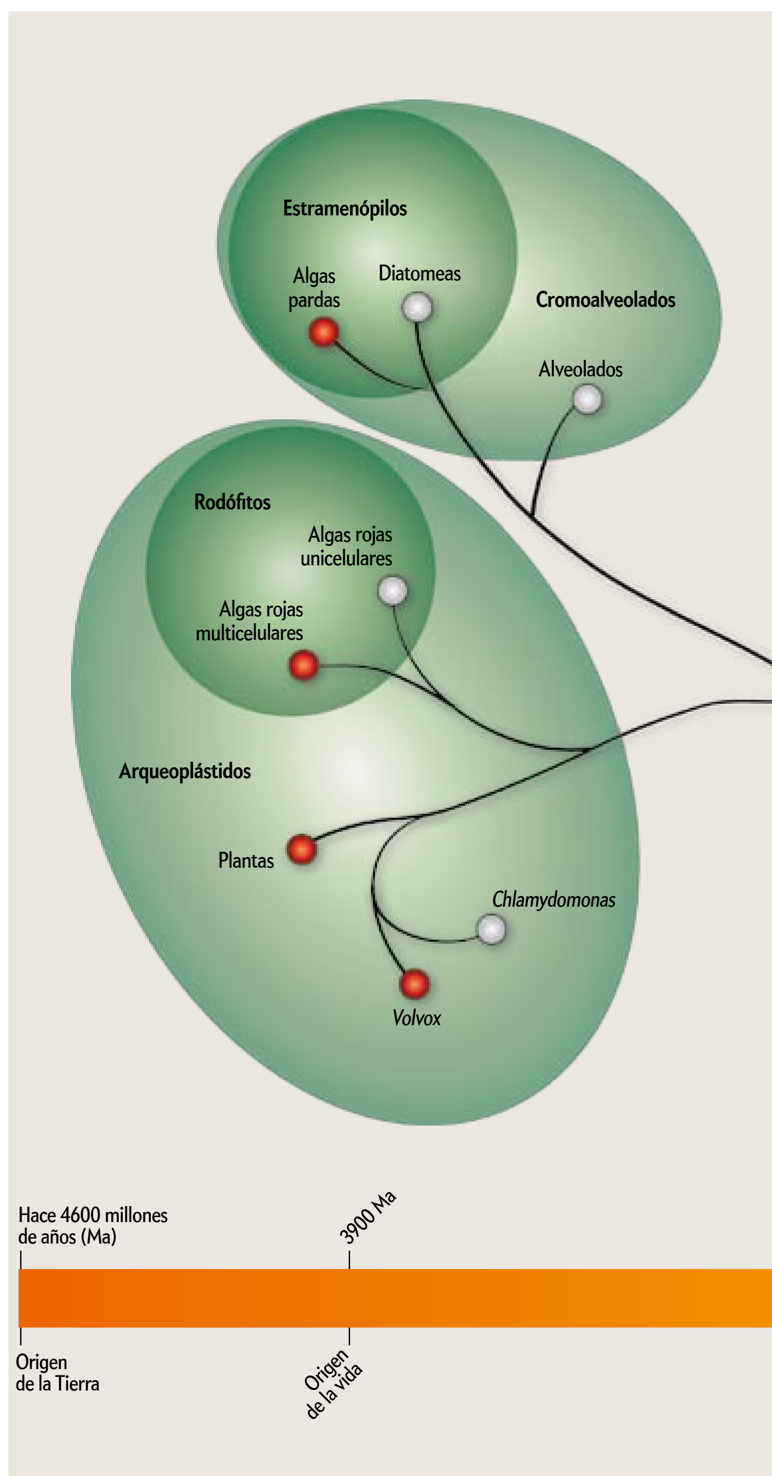
Antes de ahondar en el origen de los animales, centrémonos en dos cuestiones básicas: cómo se genera un organismo multicelular y qué ventajas aporta ser multicelular. La formación de un organismo multicelular puede seguir dos caminos: clonal o agregativo. La multicelularidad clonal resulta de una división celular incompleta, en la que las células hijas no se separan. La agregativa se obtiene mediante la unión de diferentes células genéticamente distintas. La mayoría de los organismos multicelulares se generan por división clonal. El caso agregativo es minoritario y facultativo; suele darse solo en algunas fases del ciclo biológico de la especie.

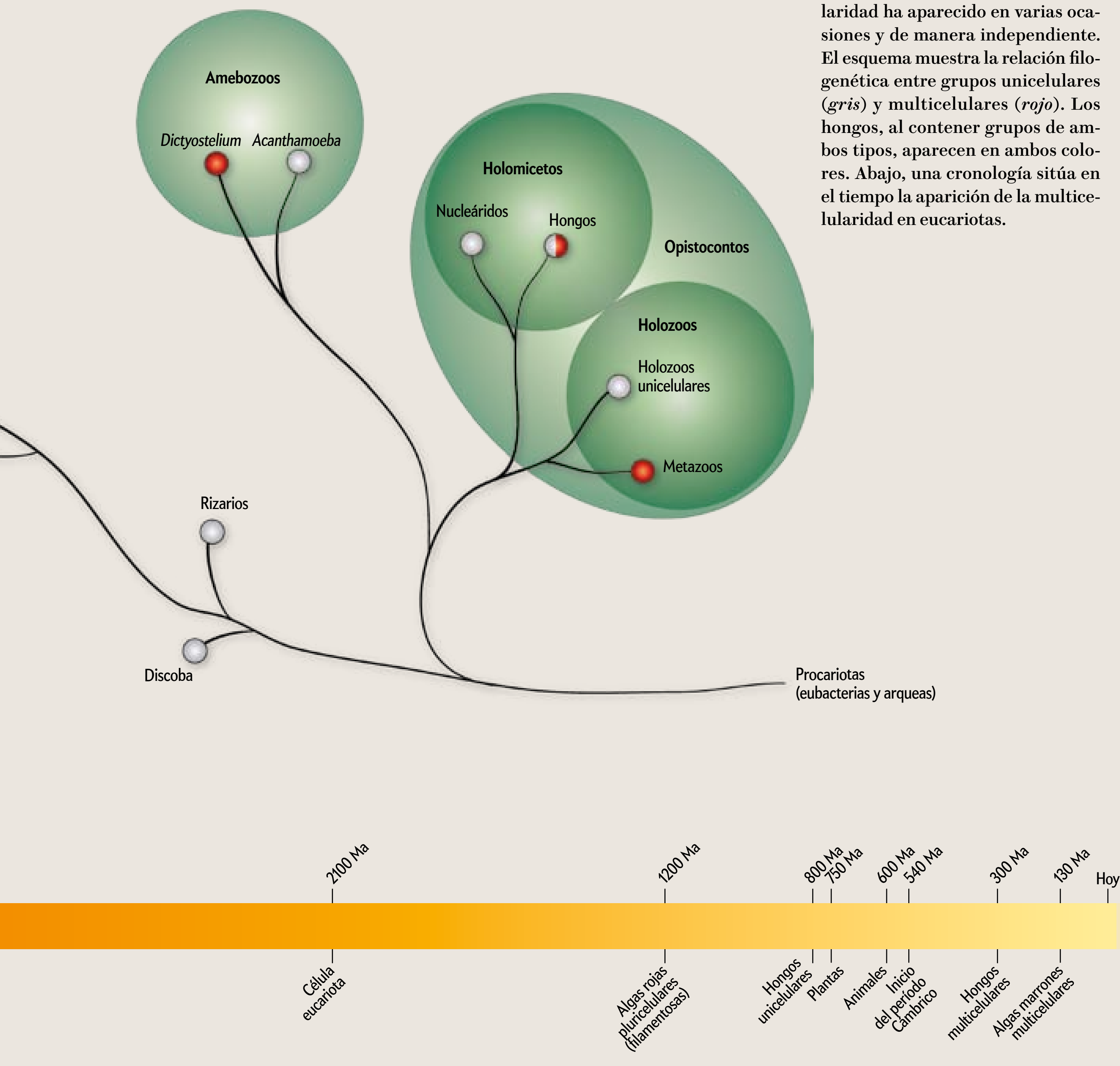
En cuanto a las posibles ventajas adaptativas de la multicelularidad, existen varias hipótesis. Las más relevantes corresponden al aumento del tamaño corporal y la división del trabajo. El aumento del tamaño corporal permitió colonizar un nicho ecológico hasta entonces no explotado: el de las formas de vida de tamaño superior. Además, al aumentar las dimensiones se evitaba la depredación por organismos unicelulares, según el principio de «demasiado grande para ser comido».

La división del trabajo aporta, sin duda, una gran ventaja adaptativa: la posibilidad de llevar a cabo de forma simultánea varios procesos celulares, incluso algunos en principio incompatibles entre sí o que compiten por la misma maquinaria celular. Un ejemplo clásico que ilustra esta problemática concierne a dos procesos básicos: la motilidad y la división celular. Paradójicamente, ambos utilizan —y compiten— por la misma maquinaria. Un organismo unicelular debe escoger entre moverse o dividirse (en una célula la maquinaria microtubular puede utilizarse para formar un flagelo, que confiere motilidad, o para separar el material genético entre las células hijas). No puede hacerlo todo a la vez. En cambio, un organismo multicelular puede permitirse el lujo de tener células especializadas en el movimiento y otras especializadas en la división, de manera que puede llevar a cabo las dos funciones al mismo tiempo y en todo momento.

Al aumento de tamaño y la división del trabajo se añade una tercera ventaja de la multicelularidad. Nos referimos a la capacidad de dispersión. Un buen ejemplo de ello corresponde a la capacidad, en organismos terrestres, de producir fructificaciones mediante agregación de células individuales; ello aumenta la dispersión de las esporas y, por tanto, el alcance de la progenie, lo que facilita la colonización de nuevos espacios.

Pero no todo son ventajas. La multicelularidad acarrea también ciertos inconvenientes, como la necesidad de desarrollar mecanismos de control. En un escenario en el que varias células trabajan para un único organismo, se produce una competencia celular; difícilmente puede evitarse la presencia de células «tramposas», que buscan beneficiarse de las ventajas del grupo mientras aportan lo mínimo. Hallamos un claro ejemplo de este fenómeno en el cáncer, que no es otra cosa que un grupo de células tramposas que deciden no seguir las normas del grupo y crecer solas sin realizar la función que les corresponde en el organismo. El contexto multicelular exige, pues, la creación de una serie de mecanismos de control —innecesarios en el caso unicelular— que salvaguarden la estabilidad e integridad del grupo. De ahí la existencia de genes cuya función es controlar la proliferación celular o reconocer la iden-





El árbol de la vida: A lo largo de la historia de la vida, la multicelularidad ha aparecido en varias ocasiones y de manera independiente. El esquema muestra la relación filogenética entre grupos unicelulares (*gris*) y multicelulares (*rojo*). Los hongos, al contener grupos de ambos tipos, aparecen en ambos colores. Abajo, una cronología sitúa en el tiempo la aparición de la multicelularidad en eucariotas.

tidad de las células vecinas. Asimismo, dado que el organismo multicelular también necesita que sus células puedan unirse entre sí, comunicarse y diferenciarse en diferentes tipos celulares, posee genes implicados en la adhesión, la comunicación y la diferenciación celular.

ORÍGENES MÚLTIPLES

A diferencia de otras grandes transiciones evolutivas, como la aparición de la vida, de la célula eucariota o del lenguaje, el origen de la multicelularidad es múltiple: ha aparecido no una, sino varias veces, y de manera independiente, a lo largo de la historia de la vida.

Ya en procariotas encontramos varias apariciones independientes de multicelularidad, tanto en cianobacterias, como en mixobacterias y actinomicetes. El caso de las cianobacterias multicelulares es uno de los más conocidos. Estas se componen de hileras de células donde la mayoría hacen la fotosíntesis y unas pocas han perdido la clorofila (el pigmento que permite realizar la fotosíntesis), especializándose en la fijación del nitrógeno ambiental.

Sin embargo, es en los eucariotas donde la transición a la multicelularidad se ha producido más veces y donde ha alcanzado su mayor complejidad y esplendor. Aunque la mayoría de los eucariotas son unicelulares, en casi todas las ramas del árbol evolutivo eucariota hallamos linajes multicelulares originados a partir de ancestros unicelulares. Ello ocurre en los protistas ciliados, los hongos mucilaginosos (*Dictyostelium*), las algas verdes (y sus parientes las plantas), las algas marrones y las rojas, los hongos y los animales (o metazoos). La multicelularidad más compleja (con mayor número de tipos celulares) es la que se da en plantas y animales.

LA APARICIÓN DE LOS ANIMALES

Está claro que la aparición del reino animal transformó radicalmente la faz de la Tierra. Dio lugar a una gran diversidad de morfologías y grados de complejidad, desde las esponjas, con pocos tipos celulares, a seres tan complejos como los humanos, pasando por los artrópodos, los cnidarios, los moluscos, los gusanos o los equinodermos. Todos los animales compartimos la multicelularidad, además de un desarrollo embrionario inherente. Según el registro fósil, la aparición de los primeros animales o, en otras palabras, la transición de eucariotas unicelulares (o protistas) a animales, ocurrió hace unos 600 millones de años. Sin embargo, se desconocen todavía los cambios genéticos o genómicos que subyacieron bajo la transformación de un protista en el primer animal multicelular.

Hasta la fecha, la mayoría de las investigaciones que pretendían abordar esa pregunta lo hacían desde una perspectiva «animal»; es decir, mediante la comparación de los genomas de los animales que divergieron más temprano (cnidarios, esponjas) con los de los animales que aparecieron más tarde (vertebrados, artrópodos). El primer genoma secuenciado de una esponja (*Amphimedon queenslandica*), obtenido en 2010 por el grupo de Bernard M. Degnan, de la Universidad de Queensland, mostró que estos sencillos organismos contenían un reservorio genético muy rico, con numerosos genes involucrados en el sistema nervioso (si bien carecen de sistema nervioso) y en el inmunitario. A partir de estos datos se supo que los primeros animales poseían ya una notable complejidad genética. El misterio continuaba residiendo en el estudio de los ancestros unicelulares.

NUESTROS ANCESTROS UNICELULARES

Hasta hace escasos años, poco se sabía sobre cuáles eran los organismos unicelulares filogenéticamente más cercanos a los animales. Se sospechaba, ya desde de la época de Ernst Haeckel (1834-1919), que un grupo de protistas flagelados y de vida libre, los coanoflagelados, podían estar estrechamente emparentados con los animales (o con las esponjas), pues la morfología celular de estos seres guardaba una sorprendente semejanza con la de uno de los tipos celulares más característicos de las esponjas, los coanocitos. Tanto los coanocitos de las esponjas como los coanoflagelados poseen un flagelo rodeado por un collar de microvellosidades que utilizan para capturar bacterias. Con la llegada de las técnicas de secuenciación masiva y la filogenia molecular (basada en la comparación de secuencias nucleotídicas o aminoacídicas), se comprobó que los coanoflagelados se hallaban estrechamente emparentados con los animales. A ello contribuyeron especialmente las investigaciones lideradas por Peter W. Holland, de la Universidad de Reading, y los trabajos dirigidos por Franz Lang, de la Universidad de Montreal, cuyos resultados se publicaron en *Current Biology* en 2001 y 2002, respectivamente. Asimismo, cabe destacar los estudios que el grupo de Nicole King, de la Universidad de California en Berkeley, publicó en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* en 2001.

Pero, no solo los coanoflagelados. Según investigaciones recientes de uno de los autores (Ruiz Trillo), Andrew J. Roger, de la Universidad Dalhousie, y otros colaboradores, también son parientes cercanos de los animales otros linajes unicelulares: entre ellos los filastéreos, los ictiospóreos y la especie *Corallochytrium limacisporum*. Los filastéreos constan únicamente de dos especies conocidas, *Capsaspora owczarzaki* y *Ministeria vibrans*. Ambas corresponden a amebas unicelulares cubiertas de filopodios. Sin embargo, sus hábitos son dispares: *Capsaspora* vive dentro de un caracol, supuestamente en forma de simbionte o parásito; *Ministeria* medra en los océanos y se alimenta de bacterias. La mayoría de los ictiospóreos, por contra, son parásitos o bien organismos con fases del ciclo biológico asociado a los animales. Suelen presentar ciclos complejos, con una fase colonial reproductiva que libera formas unicelulares dispersivas, ya sean amebas o esporas flageladas, según la especie.



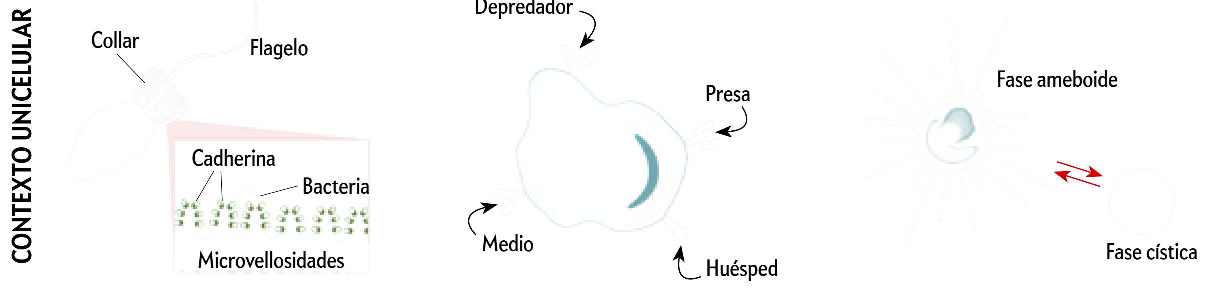
El eucariota *Dictyostelium discoideum* pertenece a un linaje muy alejado de los hongos, los animales y las plantas. Si bien es unicelular durante la mayor parte de su ciclo biológico, para reproducirse forma agregados de células distintas genéticamente que se organizan en un pedúnculo reproductor (*fotografía*). Se trata de un claro ejemplo de multicelularidad agregativa, distinta a la clonal, típica de animales y plantas.

ALEX WILD

Nuevas funciones para proteínas ancestrales

Durante mucho tiempo se ha pensado que las moléculas implicadas en la multicelularidad y el desarrollo animal eran exclusivas de los animales. Sin embargo, los estudios de genómica comparada están demostrando que ello no es así. Se han hallado en ancestros unicelulares genes que codifican moléculas asociadas a la multicelularidad.

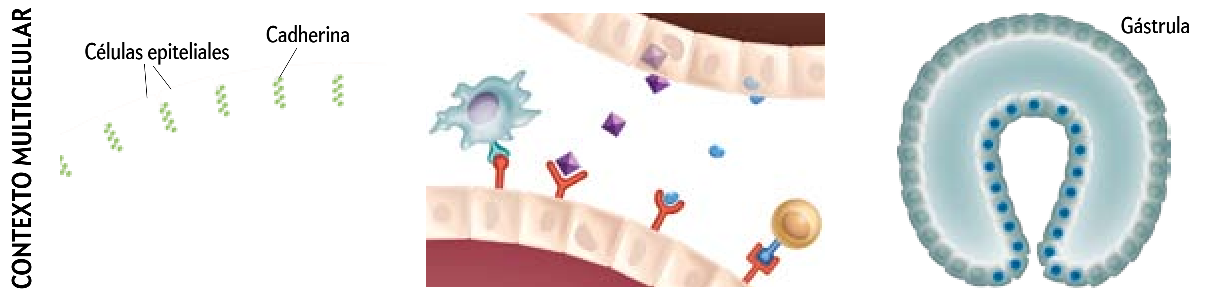
Se trata de proteínas implicadas en la adhesión, la comunicación y la diferenciación celular, funciones típicas del contexto multicelular. Los animales no habrían «inventado» estas moléculas, sino que les habrían dado una nueva función, de acuerdo con las nuevas necesidades. El recuadro muestra tres maquinarias moleculares que habrían cambiado de función (se habrían reutilizado) al pasar de un contexto unicelular a uno multicelular.



Preteínas transmembrana: de la captura de bacterias a la adhesión celular
Los coanoflagelados (*arriba*), un grupo de protistas flagelados de vida libre, poseen en su collar unas proteínas transmembrana, las cadherinas (*verde*), que utilizan para atrapar bacterias. En las células epiteliales (*abajo*), estas moléculas sirven para mantener las células unidas entre sí.

Receptores de membrana: de la captación de señales ambientales a la comunicación intercelular
En ciertos protistas (*arriba*), las tirosina quinasas (*rojo*) reciben señales diversas del entorno, que les informan sobre la presencia de una presa o un depredador, la salinidad del medio, etcétera. En un organismo multicelular (*abajo*), con tejidos distintos, estos mismos receptores de membrana permiten el intercambio de información entre células.

Factores de transcripción: de la regulación del ciclo biológico a la diferenciación celular
La ameba *Capsaspora owczarzaki* (*arriba*) posee varios factores de transcripción (*azul oscuro*); se cree que podrían regular las fases del ciclo biológico. En los animales (*abajo*), estas moléculas regulan la gastrulación (etapa fundamental en el desarrollo embrionario) y, por tanto, la diferenciación celular.



GENÓMICA COMPARADA

El conocimiento de cuáles son los linajes unicelulares más cercanos a los animales abrió la puerta a los estudios de genómica comparada. Se basan estos en secuenciar el genoma completo de algunos de estos linajes unicelulares y compararlo con el genoma de animales más basales. Una aproximación que nos permite inferir qué genes poseía el ancestro unicelular que dio lugar a todos los animales.

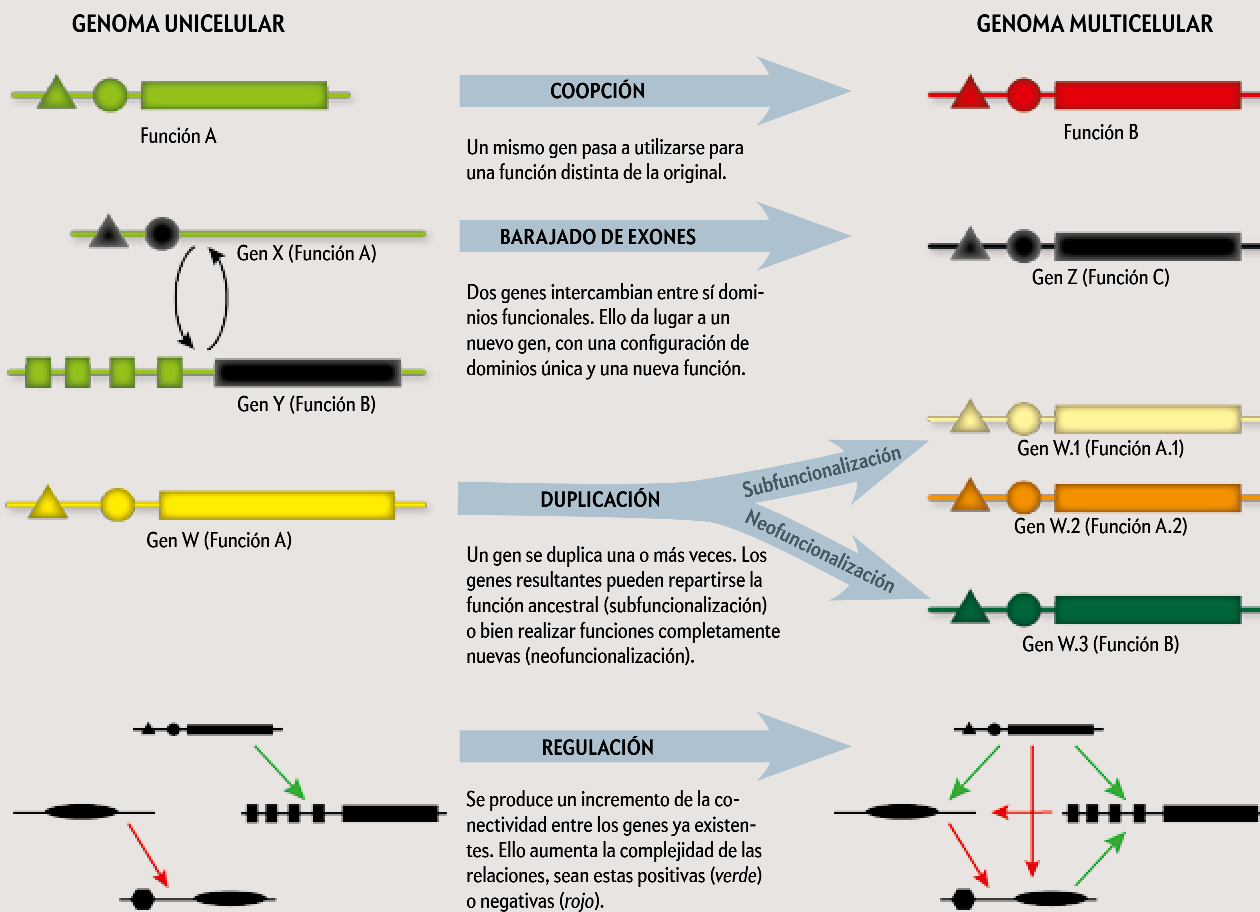
De hecho, la reciente secuenciación del genoma de varias especies de esos parientes unicelulares, realizada por los autores y otros investigadores en el marco del proyecto europeo Multicellgenome, ha cambiado radicalmente nuestra visión sobre el origen de los animales. La idea más extendida anteriormente era que el origen de los animales representó un cambio tan drástico que implicó la invención de un gran número de genes clave para la multicelularidad y el desarrollo animal. Esta hipótesis ligaría con la repentina aparición y diversificación de las formas animales observada en el registro fósil (explosión Cámbrica). La visión actual, en cambio, sugiere otra historia evolutiva, según la cual muchos de los genes implicados en la multicelularidad animal existirían ya en un contexto unicelular y habrían sido posteriormente readaptados para nuevas funciones.

GENES «MULTICELULARES» EN ORGANISMOS UNICELULARES

Un ejemplo claro de esta evolución genética corresponde a los genes implicados en la adhesión celular en animales, como las cadherinas (proteínas transmembrana que mantienen las células unidas entre sí) o las integrinas (proteínas encargadas de unir las células a la matriz extracelular). Dado que ni hongos, ni plantas, ni ningún otro grupo eucariota poseen cadherinas o integri-

Bricolaje evolutivo

Las primeras teorías sobre el origen de la vida animal en la Tierra suponían que debió de producirse una gran transformación genética que implicó la aparición de nuevos genes clave para la multicelularidad y el desarrollo animal. Sin embargo, los estudios de genómica comparada indican que muchos de los genes asociados a la multicelularidad se hallaban ya presentes en nuestros ancestros unicelulares. Para que apareciesen los animales no hizo falta inventar nuevos genes: bastó con modificar los ya existentes para que pudieran realizar otras funciones. A continuación se muestran los mecanismos evolutivos que habrían permitido el desarrollo de nuevas funciones (multicelulares) a partir de genes ancestrales (unicelulares): coopción, barajado de exones (*exon shuffling*), duplicación y regulación.

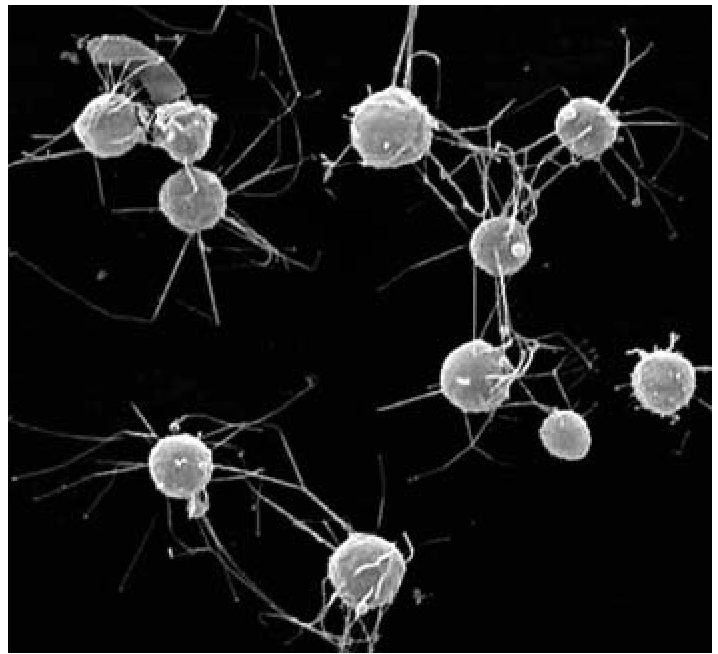


nas, estas se consideraban «invenciones» de los animales. Para sorpresa de muchos, el análisis del genoma de los parientes unicelulares de animales ha demostrado que esto no es así.

Los coanoflagelados contienen una gran variedad de cadherinas, alojadas en el collar que usan para atrapar a sus presas. Ello ha sugerido que, en un contexto unicelular, estas servirían para atrapar bacterias y que, luego, en un posterior escenario multicelular, se utilizarían para unir células entre sí. Lo mismo pasa con las integrinas, que, si bien ausentes en los coanoflagelados, se hallan presentes en los otros dos linajes de parientes unicelulares, filastéreos e ictiospóreos. Vemos, pues, que los dos grandes sistemas de adhesión multicelular animal tienen un origen anterior a la aparición de los animales; no fueron, por tanto, una novedad de ese linaje.

Otro caso curioso corresponde a las tirosina quinasas, uno de los grupos de proteínas más importantes en la comunicación celular. La mayoría de estas enzimas son transmembrana. La parte orientada al exterior celular se une a un ligando; esta unión activa la parte interna, que empieza una cadena de transducción de señal que acabará modificando el comportamiento celular, provocando cambios en la motilidad o en la proliferación. También las tirosina quinasas se consideraban exclusivas de los animales y una de las grandes «invenciones» que dieron lugar a la gran complejidad de formas del reino animal. Sin embargo, nuestras investigaciones realizadas en colaboración con el grupo de Gerard Manning, del Instituto Salk, los cuestionaron: descubrimos que los parientes unicelulares de los animales contienen no uno, sino cientos de genes de esta familia de proteínas; en algún caso llegan incluso a sobrepasar el número presente en humanos. Probablemente estas tirosina quinasas preanimales operan como un sistema dinámico para captar señales del medio —aunque esto está por demostrar—. El ancestro común de los animales habría adaptado este sistema a un contexto multicelular mediante la internalización de su función: en vez de captar señales ambientales, el sistema recibe señales secretadas por otros tejidos del

Ministeria vibrans **es una de las dos especies de filastéreos que se conocen hoy en día. De vida libre, esta ameba recubierta de filopodios se alimenta de bacterias. El estudio de su genoma aporta información clave sobre la evolución de genes como los que codifican las tirosina quinasas.**



mismo organismo, lo que permite comunicar y coordinar diferentes grupos de células.

Como ya hemos comentado, el control de la diferenciación celular resulta clave para un organismo multicelular. De hecho, si en cada tipo celular (desde una neurona hasta una célula muscular) se producen unos cambios morfológicos y funcionales distintos, es porque cada uno de ellos expresa un conjunto diferente de genes. Los factores de transcripción, un grupo de proteínas que se unen al ADN y regulan la expresión génica, son los encargados de esta diferenciación celular.

Todos los organismos poseen factores de transcripción. Sin embargo, nos interesan especialmente los que guardan mayor relación con la multicelularidad compleja que define a los animales: nos referimos a los que especifican los distintos tejidos y tipos celulares. Durante largo tiempo, algunos de estos factores de transcripción se consideraron exclusivos de los animales. Nuevamente, el análisis genómico que hemos llevado a cabo de los parientes unicelulares ha demostrado que ello no es así. Valga un único gen como muestra.

El gen *Brachyury* codifica un factor de transcripción que en los animales regula la gastrulación (etapa clave del desarrollo) y está implicado en la formación del mesodermo, la hoja embrionaria que da lugar a los músculos y otras estructuras. Pues bien, el genoma de la ameba *Capsaspora owczarzaki* contiene un homólogo de *Brachyury*, además de una amplia gama de genes correspondientes a otros factores de transcripción que nadie antes hubiese imaginado fuera del reino animal y menos todavía en organismos unicelulares.

¿Qué hace una proteína como Brachyury, que regula el desarrollo embrionario, en una ameba unicelular? Aunque a día de hoy es solo una hipótesis, resulta plausible suponer que la función de estos factores de transcripción en un contexto unicelular sería la de regular las fases del ciclo biológico del protista; durante la evolución del linaje animal, estos habrían sido reclutados para regular a un número cada vez mayor de genes, configurándose así las complejas redes de regulación genética que permiten especificar las decenas de tipos celulares que conviven en un animal adulto.

MECANISMOS DE INNOVACIÓN

Sin duda, el estudio del genoma de nuestros parientes unicelulares ha cambiado la visión sobre el origen de los animales. Estos no se originaron y diversificaron debido a un cambio drástico del genoma en el primero de ellos. No apareció una batería de invenciones génicas que permitieron la creación de esta variedad de formas animales. Sí hubo algunas novedades significativas, como los genes *Hox*, claves en el desarrollo animal, y nuevos sistemas de señalización, como las vías de transducción de señal *Wnt*, *Notch* y *Hedgehog*, que tuvieron una gran importancia en la evolución de formas animales más complejas. Y también se amplió el número de genes implicados en la comunicación celular. Pero muchos de los genes asociados a la multicelularidad se hallaban ya presentes en nuestros ancestros unicelulares.

Lo anterior indica que, además de la aparición de nuevos genes, hubo otros mecanismos evolutivos mediante los cuales se generaron nuevas funciones génicas durante la transición del mundo unicelular al multicelular. En la actualidad se conocen cuatro de estos mecanismos: barajado de exones (*exon shuffling*), duplicación, coopción (readaptación de genes ya presentes para el desarrollo de nuevas funciones) y regulación (ampliación del abanico de funciones mediante una mejor y mayor regulación genética). Las investigaciones de nuestro grupo han subrayado la importancia clave de los dos últimos en el origen de la multicelularidad.

Averiguar el modo en que la coadaptación y la regulación génicas operaron en el origen de los animales constituye el siguiente paso para poder entender el origen de la multicelularidad. Si comprendiéramos la función de las integrinas o del gen *Brachyury* en nuestros parientes unicelulares, podríamos entender cómo lograron coadaptarse e incorporarse en una red de regulación genética más compleja. Sin duda queda mucho trabajo por delante y muchos de los esfuerzos presentes y futuros de nuestro grupo de investigación van encaminados en esta dirección.

Indudablemente, la aparición de los animales cambió radicalmente la vida sobre la faz de la Tierra, modificando los ecosistemas y permitiendo la aparición del mundo que conocemos hoy en día. El lector sabrá ahora de dónde proceden muchas de las herramientas básicas de su multicelularidad, una invención revolucionaria que nuestros ancestros unicelulares, en su empeño por adaptarse al medio, empezaron a fraguar hace cientos de millones de años.

PARA SABER MÁS

First signals. The evolution of multicellular development. John Tyler Bonner. Princenton University Press, 2001.
The genome of the choanoflagellate *Monosiga brevicollis* and the origin of metazoans. N. King, M. J. Westbrook y S. L. Young et al. en *Nature*, vol. 451, págs. 783-788; 2008.
Ancient origin of the integrin-mediated adhesion and signaling machinery. A. Sebé-Pedros et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 107, págs. 10.142-10.147; 2010.
Unexpected repertoire of metazoan transcription factors in the unicellular holozoan *Capsaspora owczarzaki*. Arnau Sebé-Pedrós et al. en *Molecular Biology and Evolution*, vol. 28, págs. 1241-54, 2010.
The multiple origins of complex multicellularity. A. H. Knoll en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences 39*, págs. 217-239, 2011.
Genomic survey of premetazoans shows deep conservation of cytoplasmic tyrosine kinases and multiple radiations of receptor tyrosine kinases. Hiroshi Suga et al. en *Science Signaling 5*, núm. 222, pág. ra35; 2012.
Página web del proyecto sobre el genoma multicelular: **www.multicellgenome.com**

INNOVACIÓN

Un vidente profesional

El mayor fabricante mundial de circuitos integrados tiene en su plantilla un futurólogo, Brian David Johnson, encargado de prever cómo serán la computación y sus dispositivos en 2020 y más adelante

Larry Greenemeier

Gran parte del éxito de Intel en las cuatro últimas décadas como fabricante de microprocesadores se debe a su capacidad de comprender y prever el futuro de la tecnología. Gordon Moore, cofundador de Intel, aseguró en 1965 que cada dos años se duplicaría el número de transistores integrados en un chip. Esta famosa aseveración, conocida luego como Ley de Moore, resultó ser una predicción exacta de lo que su empresa sería capaz de lograr con generosas inversiones en investigación y desarrollo y una meticulosa planificación de los productos.

A medida que los microprocesadores de Intel se hacían más pequeños, más rápidos y más baratos, nacían dispositivos informáticos personales y móviles que antes solo habían existido en la ciencia ficción. No es de extrañar, pues, que la ciencia ficción sea una de las mayores inspiraciones de Brian David Johnson, futurólogo oficial de Intel, al que le pagan por concebir visiones tanto de posibles tecnologías de Intel como de las perspectivas de la industria informática en su conjunto para los años venideros.

EN SÍNTESIS

Brian David Johnson es futurólogo y planificador tecnológico en Intel Corporation. Sus investigaciones se centran en moldear el futuro.

Mediante las ciencias sociales y la computación, elabora modelos del futuro que guían el trabajo de los ingenieros y el equipo de desarrollo de productos.

En 2020, nuestra relación con los sistemas informáticos habrá sido modificada por las redes de sensores, la agregación de datos y la incesante miniaturización de la potencia de cálculo.

CHRIS MUELLER



Dentro de este inusual cometido, una de las principales actividades de Johnson es la promoción del Proyecto Mañana (*Tomorrow Project*) de Intel, iniciado en 2011 con el fin de suscitar debates públicos acerca del rumbo de la informática y de su efecto en la sociedad. Como parte de ese proyecto, Intel también publica antologías de relatos breves de ciencia ficción (con introducciones de Johnson) que se centran más en lo que la ciencia pura y dura pueda deparar que en fantasías que infrinjan las leyes de la física. Todos esos relatos, sin embargo, pretenden transmitir el mensaje de que la humanidad sigue controlando su propio destino.

Nuestra redacción conversó hace unos meses con Johnson sobre qué le asusta más a la gente del futuro de la tecnología, las lecciones que nos brinda el pasado y las cualidades necesarias para pronosticar bien (¿son naturales o adquiridas, o un poco de lo uno y lo otro?). A continuación ofrecemos unos extractos de la entrevista.

¿Cuál será la sensación que se tendrá al utilizar un ordenador en 2020?

Tengo buenas y malas noticias. ¿Por dónde quiere que empiece?

Vayan primero las malas, lo que en realidad no es malo, sino más pragmático. En 2020, la sensación de usar un ordenador se parecerá mucho a la actual. Todavía utilizaremos teclados y ratón, pantallas táctiles y controles de voz. Seguiremos navegando por la Web y «chateando» con los amigos; muchos seguirán teniendo atestado su buzón de entrada del correo electrónico. No creo que esto sea malo. A mí me parece incluso que conforta, pero no tiene el gancho de que llevásemos unos reactores a la espalda o de que hubiese coches cohete. Vamos ahora con lo bueno.

En 2020 usar un ordenador será impresionante. Igual que el ratón, la pantalla táctil y el control por la voz modificaron radicalmente nuestra relación con los sistemas informáticos, también lo harán las redes de sensores, la agregación de datos y la incesante miniaturización de la potencia de cálculo. En realidad no hago predicciones, pero sí puedo asegurarle que en el futuro tendremos más ordenadores y mayor potencia de cálculo, que se integrará más a fondo en nuestro quehacer diario.

Imagínese que pudiera programar su ordenador por el mero hecho de vivir con él y de llevarlo por ahí en un bolso o en una cartera. Me parece de lo más emocionante, ya que significa que la manera de diseñar y construir esos sistemas, de escribir los programas, de crear las nuevas aplicaciones que apetece tener y los nuevos grandes servicios será enteramente distinta a lo que se ha hecho en los diez últimos años.

Háblenos de alguna investigación interesante, especulativa, que tenga entre manos.

Me encanta fijarme en los paralelismos existentes entre los ordenadores personales y la biología sintética (el uso del ADN, las enzimas y otros elementos biológicos para elaborar sistemas nuevos). Recuerde que el ordenador personal fue fruto en parte del movimiento contracultural, de los hippies, del trabajo de Intel y del de Steve Jobs y Woz (Steve Wozniak, cofundador de Apple). Recuerde los clubes y pequeños grupos de apasionados informáticos que se formaron, y se dará cuenta de que en la biología sintética sucede hoy algo muy, muy semejante. En gran parte es obra de menores de 20 años, de entusiastas que se reúnen y hablan de ello. Entonces uno puede decir que, si esto es cierto, habrá que ver si la biología sintética y los ordenadores personales se desarrollan al mismo ritmo. Eso puede ayudar a prever el futuro de diversas tecnologías.

¿Ha hecho investigaciones reales de biología sintética?

He trabajado mucho con un biólogo sintético, Andrew Hessel, que colabora con la Cooperativa Pink Army (el «Ejército Rosa», que promueve terapias individualizadas para el cáncer de mama) y estudia el diseño de virus, así como de ADN. Si asimilamos el ADN al soporte lógico (*software*) y un organismo —bacteria o virus— al soporte físico (*hardware*), la unión de ambos constituirá un dispositivo computador.

Cuando se carga una aplicación GPS en el teléfono móvil lo convertimos en un teléfono GPS. Pero lo realmente impresionante en la biología sintética es que te vas a dormir con un organismo y cuando te despiertas a la mañana siguiente ya son dos, y más tarde cuatro. Se han convertido en dispositivos computadores autorreplicantes.

¿Algunas ideas?

Un curioso ejemplo con el que nos entretuvimos Andrew y yo era el de resolver el problema del «último kilómetro» de la conectividad en red. Se trata del último kilómetro, en sentido literal, de la conexión entre un concentrador de la Red y la propia vivienda. Imaginemos que hubiésemos creado un organismo que fuese un excelente conductor de la señal de Internet, mejor que el cable y los hilos de cobre que utilizamos hoy. Todo lo que tendríamos que hacer es extender ese diminuto organismo entre la casa y el concentrador de la Red, y ya podríamos estar noche y día descargando películas de alta definición.

Pero ¿cómo lo haríamos? ¿Y si hibridásemos nuestro organismo superconductor con simientes de hierba de tal manera que brotara, creciera y pudiera mantenerse como hierba? Imagínese que allá donde se ve hierba hubiera una red superconductora mallada (todos los nodos pueden ser repetidores de la información de otros) que llevase Internet hasta donde llegasen las briznas. ¡Y estaría viva! Los que han cuidado césped alguna vez saben que si se lo trata bien sigue creciendo, incluso en lugares donde no se quiere que salga. El mantenimiento del césped y el mantenimiento de la red serían una y la misma cosa. Las medianeras de hierba que separan los sentidos de circulación en muchas autopistas de todo el mundo podrían convertirse, entiéndase al pie de la letra, en autopistas de la información.

«El futuro se mueve sin cesar: no es ese punto fijo hacia el que todos, de algún modo, corremos sin poder evitarlo.»

¿De qué manera puede influir la ciencia ficción en la investigación y desarrollo reales?

Entre la ciencia ficción y el hecho científico hay toda una historia de simbiosis: la ficción informa a los hechos. Doy muchas

conferencias sobre inteligencia artificial (IA) y robótica; en ellas hablo de la inspiración que aporta la ciencia ficción y de cómo podemos valernos de ella para jugar con esas ideas. Una y otra vez hay alguien que se me acerca, me lleva a un lado y me confiesa: «¿Sabe que me dediqué a la robótica por C3PO?». Me he convertido en un confesor para algunos. Le estrecho la mano y le digo: «No es usted el único. No pasa nada».

La ciencia ficción sugiere qué podría hacerse y atrapa la imaginación, lo cual tiene una enorme importancia para el desarrollo de mejores tecnologías.

¿Cómo llegó a ser el futurólogo de Intel?

En mi trabajo sobre los proyectos de Intel me valía del «moldeo del futuro» (*future casting*), que combina la informática y las ciencias sociales. Antes de ser futurólogo de Intel era arquitecto de experiencia del consumidor. Se parecía mucho a ser arquitecto de *software* o de circuitos de silicio, salvo por que yo diseñaba la experiencia, entera, que tendrían los usuarios. El arquitecto de experiencia del consumidor tiene algo de ingeniero y algo de diseñador que toma en cuenta lo que ocurrirá en cinco o diez años, por ejemplo el diseño de procesadores SOC (*system-on-a-chip*), el nuevo tipo de chip que estamos preparando con un factor de forma menor (dimensiones más reducidas). El moldeo del futuro nos ayuda a plantear preguntas, formuladas muy en serio, sobre el futuro de la tecnología y a averiguar lo que debemos fabricar. Así que, cuando Justin Rattner (director técnico de Intel) me dijo que creían que debería ser el futurólogo de Intel, mi respuesta fue: «De ningún modo». Era una enorme responsabilidad, sobre todo en una compañía como Intel.

Por aquel tiempo, Justin quería que empezase a hablar en público sobre el futuro. Todos los debates habían sido internos y nunca habíamos tratado de estos asuntos fuera de la empresa. Una semana después (el 30 de junio de 2010) publicábamos el libro *Screen future: The future of entertainment, computing and the devices we love*, que trataba sobre el estado de la tecnología en 2015. Tuve luego que dirigirme a la prensa. Casi todos me decían: «Entonces, usted es el futurólogo de Intel». En ese momento comprendí que ya desempeñaba ese puesto.

¿Cómo encaja su cometido como moldeador del futuro para Intel con el trabajo de la compañía en cuanto fabricante de microprocesadores?

En la hoja de ruta del desarrollo de Intel voy delante. Trabajo, pues, con muchos de los diseñadores de los microcircuitos, en Israel y demás lugares. Y ellos me recuerdan año tras año que tengo que estar pensando en el 2020, por ejemplo. Creo modelos que simulen la experiencia, las sensaciones que se tendrán al utilizar un ordenador en 2020. Intel es una empresa de ingeniería; por tanto, convierto esa información en requisitos y capacidades aplicables a nuestros chips. En este momento trabajo sobre el año 2019.

¿Cómo se asegura de que sus ideas sobre el futuro de Intel son compatibles con la orientación que desean dar a sus productos los fabricantes de equipo (Apple, Dell y demás) que utilizan chips de Intel en sus ordenadores?

La primera etapa de mi proceso de trabajo es la investigación social. Contamos con etnógrafos y antropólogos que, ante todo y sobre todo, estudian a la gente. No hay nada de lo que hago en el moldeo del futuro que no parta de una honda comprensión de los seres humanos, que al fin y al cabo son los usuarios de la tecnología. Después entramos en la computación. Luego me encargo de la modelización estadística. Y luego elaboro modelos de cómo va a ser el futuro. Entonces es cuando me pongo en camino.

Gran parte de nuestro trabajo consiste en salir y hablar, no solo a nuestros clientes, sino al más amplio ecosistema que forman el Gobierno, las Fuerzas Armadas y las universidades. Les pido su opinión sobre adónde va el mundo y cómo experimentaría una persona ese futuro.

¿Puede dar un ejemplo de la contribución que este mirar al futuro haya podido prestar, o preste actualmente, al diseño de un producto físico de Intel?

Nunca nos limitamos a preguntamos de qué manera podríamos hacer chips más pequeños, más rápidos y de menor coste. Nos preguntamos: ¿qué tienen que hacer con el dispositivo? ¿Cómo queremos que sea la experiencia final? ¿Qué captará la imaginación de la gente? En *Screen future* describí un futuro en el que se conectan múltiples dispositivos computadores, todos ellos trabajando conjuntamente de modo que el usuario no advierta diferencia alguna entre su PC, su televisor y su teléfono inteligente. Para la gente solo se tratará de pantallas, diferentes pantallas que les ofrecerán diversiones y el contacto con las personas queridas.

¿Escribir sobre situaciones imaginarias le ayuda en su tarea diaria?

Escribir ciencia ficción ha sido durante años parte del proceso que sigo para moldear el futuro. En Intel me sirve para explorar las implicaciones humanas, culturales y éticas de las tecnologías que construimos. Es frecuente que esas historias o esos prototipos de ciencia ficción formen parte de la especificación del producto final, es decir, del «pliego de condiciones» que explica a los ingenieros y al equipo de desarrollo lo que hay que construir. Algunos de los mayores intelectos científicos, como Albert Einstein y Richard Feynman, se valieron de la creatividad y la imaginación en su método científico. Escribir ciencia ficción basada en hechos científicos me proporciona un instrumento verdaderamente poderoso para innovar y crear tecnologías más adecuadas para los seres humanos. Además, a los ingenieros les gusta este género literario, así que es una muy buena forma de hacerles entender mis moldeos del futuro de dentro de 10 o 15 años.

¿Cuál es el error más extendido sobre el futuro?

Mucha gente cree que ya está decidido, y le piden al futurólogo que haga una predicción. Pero el futuro es bastante más complicado. El futuro se mueve sin cesar: no es ese punto fijo hacia el que todos, de algún modo, corremos sin poder evitarlo. El futuro lo hacen día tras día los actos de las personas, y por ello tenemos que participar activamente en él. La mejor manera de influir en el futuro es hablar de él con la familia, los amigos, el Gobierno.

PARA SABER MÁS

The Tomorrow Project anthology: Conversations about the future. Cory Doctorow, will.i.am., Douglas Rushkoff y Brian David Johnson. Intel Corporation, 2011.

por David Biello

La cometa motriz

Una turbina eólica volante convierte los vientos marinos en energía eléctrica

La fuerza de los vientos oceánicos puede impulsar a velocidades de hasta 90 kilómetros por hora la cometa que arrastra un surfista sobre la superficie del mar. En la actualidad se está intentando aprovechar la energía de esos vientos para generar electricidad. Destaca en ese proyecto la turbina aerotransportada Wing 7, aquí representada. Consiste en una especie de aeromodelo autónomo que está enlazado a tierra o a una plataforma flotante; cuando el viento arrecia, los rotores elevan el artefacto hasta más de 240 metros y le hacen describir un círculo perpendicular a la dirección del viento. A medida que el aire recorre el ala de fibra de carbono, los imanes permanentes de los rotores giran y producen electricidad. «Los rotores son a la vez hélices y turbinas», señala Corwin Hardham, gerente y cofundador de Makani Power, la compañía creadora del Wing 7. A bordo lleva un ordenador que realiza ajustes continuos.

La idea de crear energía por medio de cometas, para evitar los volubles vientos próximos a la superficie terrestre, se remonta varios siglos. En fecha más reciente, hacia la década de los setenta del siglo XX, se había intentado recoger energía volando dentro de corrientes de chorro. Para afrontar ese reto, Makani se propone diseñar una



cometa que vuele en círculo sobre el océano, donde los vientos son bastante regulares, y recorra una zona del cielo muy extensa. Aun con vientos débiles, incapaces de accionar una turbina tradicional, este ligero prototipo, con una línea de anclaje, puede alcanzar más de 160 kilómetros por hora y generar así energía. En este momento, el modelo Wing 7 produce energías de hasta 30 kilovatios, ligeramente menos que un típico motor de automóvil. Para 2016, Makani planea desarrollar e instalar su primer dispositivo generador de 600 kilovatios, equiparable a una pequeña turbina eólica terrestre.

JAKE STANGEL (*fotografía*)



Energía del rotor: Los rotores actúan a la vez como turbinas y como hélices propulsoras. Cada uno de los cuatro rotores de Wing 7 contiene un imán permanente que al girar por la presión del viento genera electricidad. Los electrones descienden a tierra a través de una línea de anclaje que conecta la cometa al suelo o a una plataforma flotante.

Piloto automático: El ordenador de a bordo, ubicado tras el morro cónico, realiza ajustes para conseguir que el Wing 7 genere la máxima energía posible durante su vuelo. La cometa, de fibra de carbono, es ligera a la par que resistente: con unos 60 kilogramos de peso, es capaz de arrastrar más de tres toneladas.

por Jaume Navarro



Jaume Navarro, experto en historia de la física, es investigador Ikerbasque en la Universidad del País Vasco.

El electrón y su familia

J. J. Thomson, G. P. Thomson y el paso de la física clásica a la cuántica

En 1927, el joven catedrático de filosofía natural de la Universidad de Aberdeen, en Escocia, George Paget Thomson, publicaba las primeras fotografías en las que se visualizaba la difracción de electrones, demostrando así el principio de dualidad onda-corpúsculo. Treinta años antes había sido su padre, Joseph John Thomson, quien había mostrado que un fenómeno aparentemente ondulatorio, los rayos catódicos, eran el resultado de un flujo de corpúsculos diminutos: los electrones. En una primera lectura irónica se podría pensar que, al devolver a los electrones parte de su condición ondulatoria, el hijo estaba socavando la teoría corpuscular de la materia que su padre había construido. Nada más lejos de la realidad.

El programa de J. J. Thomson

Nacido en Manchester en 1856, J. J. Thomson pertenece a lo que un historiador de la ciencia llamó la segunda generación de maxwellianos en Cambridge: gente cuya educación se basaba en la aplicación y el desarrollo de los principios establecidos por Maxwell en su *Tratado de electricidad y magnetismo* de 1873. Su misión no era la de criticar o poner en duda dichos principios, sino la de llevarlos a la práctica y sacar todas sus consecuencias, para llegar donde Maxwell no había podido, dada su temprana muerte.

Uno de los elementos básicos de la física del siglo XIX, no solo de la de Maxwell, era la necesidad de un medio físico, el éter, que llenaba todo el espacio y cuya principal misión era explicar la acción a distancia. Sus propiedades eran con frecuencia contradictorias, pues debía tener una rigidez suficiente para transportar las fuerzas electromagnéticas pero, a la vez, ser muy flexible para no ofrecer ninguna resistencia al movimiento de los cuerpos sólidos. Esta indefinición propició que el éter se convirtiera en una sustancia omnipresente que podía sugerir conexiones con el mundo de los espíritus o la telepatía, o ideas sobre la naturaleza última de la materia, entre otros muchos usos.

El estudio de la relación entre el éter y la materia fue un tema recurrente en la carrera de J. J. Thomson. Uno de sus primeros trabajos como recién graduado de Cambridge, y con el que ganaría el prestigioso premio Adams de matemática aplicada en 1882, fue un estudio sobre la interacción dinámica entre anillos de vórtices en un fluido. Ya hacía un par de décadas que William Thomson (posteriormente Lord Kelvin) había jugado con la idea de que, quizá, los átomos no eran más que estructuras del éter. La hipótesis había encontrado un hueco en el imaginario victoriano, y J. J. Thomson contribuyó a esta especulación demostrando matemáticamente la estabilidad de determinadas configuraciones de vórtices; una estabilidad análoga a la del enlace químico entre átomos al formar moléculas. Al cabo de una década, J. J. Thomson había abandonado los anillos, pero no la idea subyacente de que la materia era algún tipo de epifenómeno del éter.

La carrera de J. J. Thomson dio un salto cualitativo al ser nombrado, a los 28 años de edad, profesor de física experimental y director del Laboratorio Cavendish de Cambridge. Esta institución contaba con apenas una década de existencia; sus primeros directores habían sido Maxwell y Lord Rayleigh. Todo un reto para el joven Thomson, quien decidió centrar su carrera en un punto que Maxwell había



J. J. Thomson y su hijo G. P. alrededor de 1910.

CORTESÍA DE SCIENCE PICTURE LIBRARY

dejado abierto en su *Tratado*: el estudio de las descargas eléctricas en tubos llenos de gases como probable trampolín para entender mejor la relación entre electricidad, éter y materia.

De hecho, J. J. Thomson nunca abandonó el trabajo con dichos tubos. Primero, hasta los primeros años del siglo xx, para establecer una teoría general de la conducción de la electricidad en gases, un trabajo por el cual se le concedió el premio Nobel en 1906. Es importante recordar aquí que el famoso experimento con rayos catódicos que le condujo a postular la existencia de corpúsculos mucho más pequeños que el más pequeño de los átomos, lo que se conocería como electrones, fue solo un elemento dentro de su búsqueda de una teoría de la conducción de la electricidad. Aunque pueda sorprender al lector contemporáneo, el electrón solo se convirtió en una partícula elemental de la materia una vez demostrado su papel central en la conducción eléctrica.

A partir de 1906 siguió trabajando con descargas en tubos, pero esta vez para estudiar las propiedades de la electrificación positiva. Este proyecto tuvo dos consecuencias inesperadas. La primera sucedió durante la Gran Guerra, cuando Francis Aston, quien había sido asistente de J. J. Thomson en los años anteriores al conflicto, transformó el dispositivo experimental en un método para demostrar la existencia de isótopos. La segunda tuvo por protagonista al hijo de J. J. Thomson: George Paget.

George Paget Thomson

G. P. Thomson nació en Cambridge en 1892 y su vida, como la de su padre, está íntimamente ligada a esa institución. Hijo de «Sir J. J.», su infancia y adolescencia estuvieron fuertemente influenciadas por su padre, quien hizo todo lo posible para que G. P. tuviese también una carrera en física. Ya de pequeño, las puertas del Cavendish estaban abiertas para él; allí conseguía los materiales para una de sus aficiones: la construcción de pequeñas maquetas de barcos. Antes de entrar en la universidad, su padre ya se había encargado de que recibiera clases particulares de matemáticas y física avanzada por parte de graduados de Cambridge. Así, G. P. Thomson fue capaz de obtener dos grados, el de matemática y el de ciencias experimentales, en los tres años que habitualmente duraban los estudios en Cambridge.

La estrecha relación entre padre e hijo se mantuvo después de la graduación, cuando G. P. Thomson decidió seguir su carrera, no solo en el laboratorio Cavendish, sino en el proyecto de su padre sobre rayos positivos. La separación llegó con la Gran Guerra, cuando J. J. se convirtió en el director del departamento de investigación y desarrollo para la coordinación y selección de ideas útiles para la guerra y G. P. fue destinado a la fábrica de aviones en Farnborough. Pero al terminar la guerra, y a pesar de que J. J. Thomson había sido sustituido por Ernst Rutherford como director del Cavendish, padre e hijo volvieron a trabajar juntos en el mismo proyecto en las dependencias que J. J. mantuvo en el laboratorio.

En 1922, G. P. Thomson consiguió la cátedra de filosofía natural en la Universidad de Aberdeen, la misma que años atrás había ocupado el joven Maxwell. A pesar de la distancia y de la libertad para iniciar el proyecto de investigación que quisiera, G. P. replicó en Aberdeen el aparataje experimental de su padre en el Cavendish para el estudio de los rayos positivos. Hay que señalar que, para entonces, la física se había movido hacia los problemas de la relatividad y de la teoría cuántica, y que el proyecto de los Thomson se hallaba, cuando menos, alejado de los temas más candentes del momento.

En 1925, G. P. Thomson leyó y comentó el principio de dualidad onda-corpúsculo que Louis de Broglie había formulado en fecha reciente. Su interpretación demuestra lo lejos que estaba de entender la radicalidad de la propuesta de De Broglie. Como tantos otros físicos británicos, G. P. entendió las ondas asociadas a los electrones solo como una limitación física de las posibles órbitas electrónicas dentro del átomo y no como una propiedad de los electrones libres.

Fue en el verano de 1926 cuando, tras la explicación del físico alemán Max Born en Oxford sobre los últimos desarrollos de la mecánica cuántica, G. P. Thomson advirtió algo importante: con apenas algunas modificaciones, su dispositivo experimental en Aberdeen era el adecuado para comprobar el comportamiento ondulatorio de los electrones libres que predecía De Broglie. Fue así como, a principios de 1927, G. P. Thomson obtuvo y publicó las primeras fotografías de la historia de la difracción de los electrones al atravesar finas láminas de diversos metales.

De la física clásica a la cuántica

Fácilmente podría pensarse que la demostración experimental de la difracción de electrones, uno de los elementos más radicales de la emergente mecánica cuántica del momento, debería haber actuado como un *experimentum crucis* para que J. J. y G. P. Thomson se convirtieran a la nueva física. Pero no fue así. J. J. Thomson se alegró de que, por fin, se demostrara algo que él había apuntado una y otra vez: que los electrones, a pesar de ser una buena explicación del comportamiento de la electricidad y de la materia, no constituían la última palabra sobre el tema; que, en realidad, los electrones eran un epifenómeno de un éter dinámico, parecido a un fluido, lo cual explicaría el comportamiento ondulatorio que su hijo acababa de demostrar.

Tampoco G. P. Thomson utilizó ese experimento para romper los lazos con la física de su padre. En una mentalidad clásica, las ondas asociadas al electrón podían ser explicadas manteniendo una cierta idea del éter, «al que ahora suele llamarse simplemente "el espacio"», solía argumentar. Es más: frente a la insistencia de la teoría cuántica en que todos los intercambios de energía se daban en unidades discretas múltiplos de la constante de Planck, G. P. Thomson defendía una y otra vez que las ondas asociadas a los electrones eran una manera de reintroducir una física del continuo, aunque fuera por la puerta de atrás.

El caso de J. J. y G. P. Thomson y su incapacidad para formar parte activa en los desarrollos de la naciente física cuántica tiene las particularidades propias de una historia familiar y concreta. Estudios recientes muestran, sin embargo, que gran parte de los problemas que ambos encontraron para aceptar la nueva física son generalizables a la mayoría de los miembros de sus respectivas generaciones, educados en el *ethos* de Cambridge previo a la Gran Guerra. No es, pues, de extrañar que el primer gran físico británico en la historia de la mecánica cuántica fuera alguien formado como ingeniero en una universidad ajena al sistema tradicional de Cambridge: P. A. M. Dirac.

PARA SABER MÁS

Masters of theory. Cambridge and the rise of mathematical physics. Chicago University Press, Chicago. 2003.

Representing electrons. A biographical approach to theoretical entities. T. Arabatzis. Chicago University Press, Chicago, 2006.

La teoría del electrón cumple 120 años. F. Wilczek. *Investigación y Ciencia* n.º 429, junio de 2012.

A history of the electron. J. J. and G. P. Thomson. J. Navarro. Cambridge University Press, Cambridge, 2012.

por Robert Gatenby



Robert Gatenby dirige el departamento de radiología y oncología matemática integrada en el Centro de Cáncer H. Lee Moffit en Tampa, Florida.

Comprender la biología del cáncer

Sin un buen marco teórico, de poco sirve la acumulación de datos genéticos

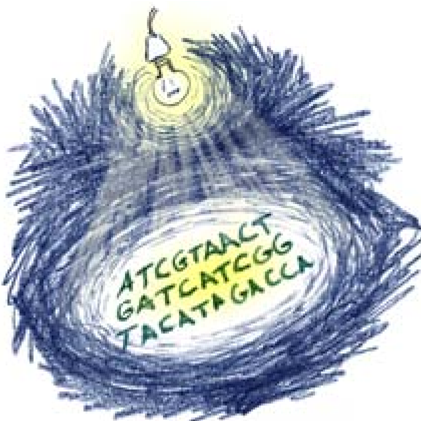
Asombrosos avances técnicos en biología molecular han transformado la biología del cáncer y han generado miles de artículos sobre genómica, proteómica y metabolómica. Pero el descubrimiento de que incluso entre las células cancerígenas de un mismo tumor existe una heterogeneidad notable ha cuestionado el valor clínico de este vasto proyecto. Los perfiles genéticos de una región pueden diferir de los de sitios distantes e incluso adyacentes, lo que ha llevado a aumentar la inversión en tecnología molecular para analizar célula por célula las poblaciones cancerígenas completas.

Imaginemos que las cosas hubieran ocurrido de otro modo. Supongamos que esos avances técnicos nunca hubieran ocurrido y que no pudiéramos obtener información molecular de ninguna población cancerígena. Sabríamos menos sobre la genética del cáncer, pero ¿sabríamos menos de su biología? En mi opinión, no necesariamente; podríamos saber incluso más.

Muchos estarán completamente en desacuerdo. La mayoría de expertos dan por hecho que los principios básicos de la biología del cáncer son genéticos. Numerosas publicaciones empiezan con la oración: «El cáncer es una enfermedad de los genes». Los estudiantes de medicina memorizan las mutaciones que se han encontrado en cada malignidad, como si eso lo explicara todo. Quizás ha llegado el tiempo de cuestionarse estas suposiciones.

Tenemos la creencia optimista de que un análisis molecular aún más detallado permitirá encontrar terapias prodigiosas contra el cáncer. Sin embargo, se ha demostrado que las terapias dirigidas suelen producir respuestas meramente transitorias que finalmente son derrotadas por la implacable evolución de las adaptaciones celulares. Por tanto, deberíamos dejar de preguntarnos: ¿aparecerán tratamientos mejores si aplicamos técnicas moleculares más refinadas todavía a poblaciones celulares más y más pequeñas?

Los físicos pueden ayudarnos a resolver esa cuestión. Estén analizando el movimiento de planetas, espectros atómicos o partículas subatómicas, no definen un sistema a partir de datos empíricos. Lo que hacen es usar los datos para apoyar o refutar un marco teórico propuesto para definir los principios que gobiernan un sistema. Para construir un marco para la biología del cáncer, propongo —parafraseando a Theodosius Dobzhansky— que el cáncer, como todo en biología, solo tiene sentido a la luz de la evolución.



Con ese mismo espíritu, me pregunto si bastan los datos genéticos, incluso si son necesarios, para entender las dinámicas evolutivas y ecológicas del cáncer y su terapia. Darwin no sabía nada de genética molecular; su modelo de evolución necesitaba tan solo de un «mecanismo de herencia» indeterminado. Durante casi cien años, los biólogos y ecólogos evolutivos observaron los sistemas vivos a diferentes escalas y desarrollaron, sin apenas conocer la genética subyacente, los principios fundamentales que gobiernan las comunidades biológicas complejas. Ello fue posible porque las dinámicas de los individuos y de sus comunidades están gobernadas por interacciones fenotípicas, y no genotípicas, con las fuerzas de selección ambiental. En decir, para entender los principios que gobiernan las comunidades de seres vivos no se requiere la genética; puede incluso entorpecer.

Pensemos en los peces cavernícolas. En las cuevas subacuáticas medran diferentes especies de peces, que se han adaptado a la oscuridad mediante el desarrollo de órganos táctiles exagerados y la pérdida de los ojos y los pigmentos de la piel. Estas criaturas han evolucionado a partir de más de ochenta especies; un ejemplo asombroso de convergencia evolutiva. El análisis genético de las poblaciones mundiales de peces cavernícolas produciría un conjunto de datos enorme y heterogéneo. Esos datos darían lugar a interesantes observaciones, pero la biología fundamental del animal resulta obvia con solo mirarlo.

Como el hombre que busca las llaves de su coche bajo la farola porque allí es donde ve mejor, nos sentimos atraídos por lugares intelectuales que prometen altos niveles de información. Pero eso no garantiza necesariamente el éxito. Dobzhansky escribió: «Los científicos tienen a menudo la ingenua creencia de que si recopilan suficientes datos acerca de un problema, de alguna manera estos se organizarán en una solución convincente y veraz».

Los enormes y complejos conjuntos de datos que se han obtenido bajo la intensa luz de la técnica molecular pueden habernos hecho descuidar líneas de investigación que podrían permitirnos organizar esta información en una «solución veraz». El desconocimiento de la evolución y ecología del cáncer nos ha impedido reconocer las limitaciones de estos datos. Las grandes inversiones y confianza depositada en estas técnicas han creado una falsa ilusión de progreso.

En última instancia, para ahondar en la biología del cáncer hace falta desarrollar un marco teórico. Como la teoría de la gravedad o la teoría cuántica de campos en física, debemos definir unos principios subyacentes que gobiernen las dinámicas no lineales que dan lugar a los ingentes conjuntos de datos generados por las creativas mentes de los biólogos moleculares. No hallaremos estos principios hasta que no busquemos en el lugar correcto.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana

Cuadernos MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.













CONSECUENCIAS HUMANAS

1. **Palma de Mallorca, 4 de febrero de 2012:** Nevadas inesperadas en una isla por lo demás cálida.

2., 3. **Carligu Mic (Rumanía), 11 de febrero de 2012:** Unos 35.000 habitantes de la región quedaron aislados, sin comida ni agua. En dos días murieron 16 personas.

4. **Washington D.C., 10 de febrero de 2010:** Una tormenta de nieve paraliza el Gobierno del país durante casi una semana.

5. **Burgos, 5 de febrero de 2012:** Un escaso tráfico circula por las autopistas, cubiertas de nieve.

6. **Este de Bosnia y Herzegovina, 6 de febrero de 2012:** Un pueblo queda completamente incomunicado a causa de la nieve.

7. **Constanza (Rumanía), 1 de febrero de 2012:** Las temperaturas en el interior descendieron hasta 34 grados Celsius bajo cero.

8. **Chicago, 2 de febrero de 2011:** Centenares de conductores quedaron retenidos hasta 12 horas en la autopista de Lake Shore Drive.






3


6


8

Charles H. Greene es profesor de ciencias de la Tierra y de la atmósfera. Dirige el programa de recursos oceánicos y ecosistemas de la Universidad Cornell y forma parte del Centro David R. Atkinson para un Futuro Sostenible, en la misma universidad. Coordina asimismo los programas educativos universitarios sobre sostenibilidad planetaria, energía y sistemas medioambientales.



CAMBIO CLIMÁTICO

Inviernos extremos

El deshielo de la banquisa ártica está provocando inviernos inusualmente fríos y nevosos en Europa y Estados Unidos

Charles H. Greene

Los tres últimos inviernos han sido inusitados en ciertas regiones de Norteamérica y Europa. Entre 2009 y 2011, la costa este de Estados Unidos y las regiones occidental y septentrional de Europa sufrieron tormentas invernales extremadamente frías y nevosas. Una de ellas, el *snowmageddon* de febrero de 2010 (de *snow*, «nieve», y Armageddon, uno de los escenarios mencionados en el libro de la Revelación), paralizó el Gobierno estadounidense durante más de una semana. Más tarde, en octubre del mismo año, el Centro de Predicción Climática (CPC) de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano estadounidense (NOAA) pronosticó un invierno benigno en la zona oriental de

EN SÍNTESIS

El calentamiento global ha acelerado el deshielo de la banquisa estival ártica. Con ello, ha alterado las condiciones atmosféricas que determinan la intensidad de los inviernos en EE.UU. y Europa.

Esos cambios permiten que el aire polar invada las latitudes medias, lo que favorece la aparición de intensas olas de frío invernales. Así ha sucedido en varias regiones durante los últimos años.

El deshielo que ha experimentado el Ártico durante el último verano augura nuevos episodios de frío intenso para este invierno. Cuando llegue la primavera, podremos evaluar los resultados.

EE.UU. para la temporada 2010-2011. Aquella predicción se basó en los efectos moderadores que La Niña debería haber inducido sobre dicha zona. Sin embargo, y a pesar de dicho fenómeno, en enero de 2011 las ciudades de Nueva York y Filadelfia experimentaron temperaturas gélidas y nevadas sin precedentes. El acontecimiento tomó por sorpresa al CPC y a otras instituciones.

El año pasado trajo consigo más sobresaltos. Mientras el este de Estados Unidos gozaba de uno de los inviernos más suaves de su historia, otras regiones de Norteamérica y Europa corrieron una suerte muy distinta. En Alaska, la temperatura media del mes de enero se situó 10 grados Celsius por debajo de la media registrada en ese mes durante los últimos años. En el sudeste de dicha región, una tormenta enterró algunas ciudades bajo una capa de nieve de dos metros. Al mismo tiempo, una ola de frío extremo descendía sobre el este y el centro de Europa, donde las temperaturas descendieron hasta los 30 grados Celsius bajo cero y la nieve alcanzó los tejados de las casas. Cuando amainó, hacia principios del mes de febrero, el temporal se había llevado por delante la vida de 550 personas.

¿Cómo explicar tales fenómenos en una década (2002-2012) que se ha revelado como la más cálida desde que comenzaron a registrarse las temperaturas globales, hace 160 años? La respuesta parece hallarse en un fenómeno moderno y sin precedentes: la acusada pérdida de banquisa ártica durante la temporada estival.

DESHIELO RÉCORD

Desde que crucé por primera vez el círculo polar, en abril de 1989, el Ártico ha experimentado una serie de cambios considerables. El más evidente ha sido la pérdida de banquisa, o hielo marino, durante los meses de verano. Durante la estación fría, el océano Ártico se congela casi por completo. La banquisa invernal consta de una gruesa capa de hielo plurianual, acumulada durante largos períodos de tiempo, y de un revestimiento estacional. Este, mucho más fino, se forma en aquellas regiones marinas que no se encontraban congeladas el verano precedente. Cada mes de septiembre, tras el deshielo estival, la extensión de banquisa se reduce a su mínimo anual.

En 1989, la superficie de la banquisa invernal superaba los 14 millones de kilómetros cuadrados. De ellos, cerca de 7 millones correspondían a la gruesa capa de hielo plurianual que persiste durante el verano. Hoy, la situación es otra. A pesar de que en 2012 la extensión de banquisa invernal mostraba unas dimensiones similares a las de 1989, poco menos de 3,5 millones de kilómetros cuadrados habían sobrevivido hasta el pasado septiembre: un mínimo histórico.

La desaparición de hielo marino durante el verano no ha seguido una pauta gradual. Entre 1979 —año en que comenzó a estimarse la extensión de hielo por medio de satélites— y el año 2000, la reducción de la banquisa no se dejó sentir de modo particular. La tasa de fusión se aceleró entre 2000 y 2006, pero no fue hasta 2007 cuando acaparó la atención mundial. Aquel año, la extensión mínima de la banquisa estival se redujo en un 26 por ciento: de unos 5,8 millones de kilómetros cuadrados en septiembre de 2006, hasta cerca de 4,3 millones en el mismo mes de 2007. Dicha disminución del hielo plurianual, de la que no constan precedentes, llevó a los climatólogos a reevaluar sus pronósticos sobre el momento en que el océano Ártico experimentará su primer verano sin hielo. A partir del análisis de los datos anteriores a 2007, el Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) vaticinaba que el primer verano sin hielo acontecería con mayor probabilidad hacia finales del siglo XXI. Hoy, numerosas investigaciones pronostican que dicho evento podría adelantarse varias décadas y sobrevenir entre 2020 y 2040.

Esa desaparición de hielo marino se debe a que, en la región ártica, los efectos del calentamiento global se han venido amplificando durante las últimas décadas. Si bien las temperaturas del resto del planeta han experimentado un aumento moderado de unos 0,8 grados Celsius desde comienzos del siglo XX, el incremento de la temperatura media del Ártico en los últimos 50 años supera el doble de ese valor. Un cambio tan rápido ha alterado la dinámica meteorológica ártica y ha causado el deshielo de vastas regiones de permafrost. Tales modificaciones han perturbado hábitats clave para la fauna y flora regionales y han amenazado la supervivencia a largo plazo de numerosas especies. Del mismo modo, las poblaciones nativas del Ártico, conocidas por sus adaptaciones culturales al frío y el hielo, están siendo testigos de una alteración sustancial de su modo de vida, lo que supone una amenaza creciente para su legado.

Aunque tales alteraciones puedan parecernos remotas para quienes vivimos por debajo de las latitudes polares, el resto del hemisferio norte no se muestra inmune a los efectos que el cambio climático ejerce sobre la banquisa del Ártico. El clima polar repercute en la dinámica meteorológica de las latitudes medias, lo cual suscita una pregunta fundamental: ¿obedecen las condiciones extremas de los últimos inviernos al calentamiento global, o forman parte de la variabilidad natural del clima terrestre?

OSCILACIONES CLIMÁTICAS

Durante mi infancia, en la década de los sesenta, quienes vivíamos en la región de Washington D.C. sufrimos una sucesión de inviernos extremadamente duros. Para llegar a la escuela, los alumnos debíamos abrirnos paso a través de la nieve. Hoy sabemos que el origen de aquel fenómeno se hallaba en la Oscilación Ártica (AO) y en la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), dos fenómenos climáticos naturales que, por aquel entonces, aún carecían de nombre. Ambos se deben a la interacción entre la atmósfera y el océano, y dejan sentir sus efectos más notables durante el invierno.

La intensidad de cada una de dichas oscilaciones queda caracterizada por un índice que cuantifica las anomalías (las desviaciones sobre el promedio a largo plazo) en la distribución invernal de la presión atmosférica sobre una región determinada. En el caso del índice de la AO, la zona en cuestión se corresponde con una extensa área que abarca desde el Polo Norte hasta el límite de la región tropical, a unos 20 grados de latitud norte (la latitud de Cuba). Una fase positiva de la AO indica presiones inferiores a la media en el Ártico y superiores a la media en la región subtropical. Cuando eso ocurre, se intensifica el vórtice polar (una circulación continua de vientos en la alta atmósfera que soplan de oeste a este alrededor del Ártico), el cual tiende a acumular grandes masas de aire frío en la región ártica.

En cambio, cuando el índice de la AO toma valores negativos, el vórtice polar se debilita y, con él, su capacidad para retener el aire frío. En consecuencia, este se desplaza hacia las latitudes medias, donde provoca inviernos muy duros y un aumento de las nevadas. El este de EE.UU. y el norte de Europa resultan particularmente vulnerables a dichos eventos en períodos en los que la AO presenta un índice negativo muy acusado.

Por su parte, el índice de la NAO caracteriza las anomalías en la distribución invernal de las presiones atmosféricas sobre una zona mucho más reducida: desde el anticiclón de las Azores (el centro subtropical de altas presiones cercano esas islas)

PÁGINAS ANTERIORES: DANIEL MIHAILESCU, GETTY IMAGES (1, 3, 7); JAMIE REINA, GETTY IMAGES (2); PABLO MARTÍNEZ MONSIVALS, AP PHOTO (4); CÉSAR MANSO, GETTY IMAGES (5); DADO RUVIC, REUTERS (6); AP PHOTO (8)

hasta el centro subártico de bajas presiones próximo a Islandia. Un valor positivo del índice de la NAO se corresponde con presiones atmosféricas superiores a la media en las cercanías del anticiclón de las Azores e inferiores a la media en la depresión subártica. En tales casos, el pronunciado gradiente de presiones intensifica los vientos que, durante todo el año, soplan de oeste a este en las latitudes medias del hemisferio norte. Esas diferencias de presión gobiernan asimismo la corriente en chorro, un rápido flujo de aire que circunvala el globo y que sigue una trayectoria que une la costa oriental de Norteamérica con el norte de Europa. Las tormentas invernales que cruzan el Atlántico Norte recorren un itinerario similar al de dicha corriente, lo que lleva un tiempo más húmedo y suave al norte de Europa.

Por el contrario, durante las fases negativas de la NAO, el gradiente de presiones se debilita y, con él, los vientos del oeste. Al abandonar la costa americana, la corriente en chorro sufre una pronunciada desviación hacia el norte, lo que la conduce hasta Groenlandia para virar luego hacia el sur, en dirección a Europa. Sin embargo, en este caso las tormentas siguen una trayectoria distinta de la que toma la corriente en chorro: cruzan sin desviarse el Atlántico Norte en dirección al sur de Europa y el Mediterráneo. Allí dejan un invierno más húmedo y suave, mientras el norte del continente europeo sufre un clima frío y seco.

Los climatólogos discrepan con respecto a si la AO y la NAO deberían considerarse dos formas distintas de variabilidad climática natural. Algunos postulan que la segunda no supone más que una manifestación de la primera en el Atlántico Norte; otros sostienen que las diferencias entre ambas resultan lo suficientemente marcadas como para tratarlas como fenómenos independientes. A pesar de que existe una correlación considerable entre los índices que caracterizan a una y otra, en ocasiones su comportamiento puede divergir de manera sustancial, tal y como sucedió el pasado invierno.

CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD NATURAL

A medida que crecen las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes de alteraciones climáticas, todo efecto que estos puedan ejercer se superpondrá a las fluctuaciones naturales del clima terrestre. Aunque resulta difícil identificar qué fenómenos se deben a la contribución humana, varias investigaciones recientes han aportado indicios que apoyan la hipótesis de que el calentamiento global y el deshielo de la banquisa ártica han afectado al desarrollo de los inviernos durante los últimos años. El nexo entre ambos fenómenos sería una modificación en los ritmos normales de la AO y la NAO.

Si nos remontamos otra vez a los años sesenta del siglo pasado, comprobaremos que, por aquel entonces, los índices de ambas oscilaciones presentaban valores predominantemente negativos. Esa circunstancia explica que el frío extremo y la nieve azotasen la costa este de Estados Unidos durante el invierno. No hay ninguna razón para pensar que aquella década de inclemencias meteorológicas escondiese algo más que la variabilidad natural asociada a ambas oscilaciones.

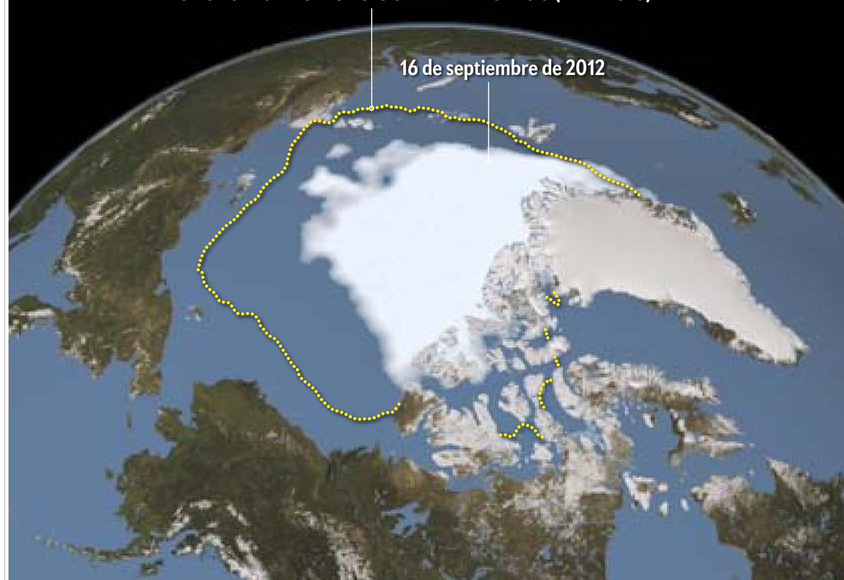
Sin embargo, entre los años setenta y noventa, el índice de la NAO tomó, sobre todo, valores positivos. Los inviernos benignos que se derivaron de ello aumentaron la conciencia social sobre el cambio climático, con lo que numerosos científicos comenzaron a apoyar la hipótesis de que las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero podían ser las responsables de aquella sucesión de inviernos con índices de la NAO positivos. Los modelos considerados por el IPCC predecían que aquella tendencia continuaría mientras siguiese aumentando la concentración de gases de efecto invernadero. Sin embargo, hacia la segunda mitad de la década de los noventa, la incidencia de inviernos con un índice positivo de la AO y la NAO se detuvo.

Con todo, la irrupción de inviernos con un índice de la NAO negativo no contradice la hipótesis que lo relaciona con un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero. Lo que los expertos no previeron en aquel momento fue que, en la región ártica, los efectos del calentamiento global comenzarían a amplificarse hacia finales de la década de los noventa. Jim Overland, de la NOAA, y sus colaboradores han bautizado el fenómeno como «período cálido ártico». Este se caracteriza por una pérdida acelerada de la banquisa ártica, así como de la capa de hielo interior de Groenlandia, el permafrost y los gla-

LA RAÍZ DEL PROBLEMA

El deshielo de la banquisa ártica

Cada invierno, la superficie del océano Ártico se cubre de hielo. Durante el verano, una parte se funde y el agua oceánica queda al descubierto. El calentamiento global ha favorecido el deshielo de la banquisa estival, lo que ha alterado el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera de tal modo que ha provocado episodios invernales de frío extremo en EE.UU. y Europa. En 1979, año en que comenzaron las observaciones vía satélite, la extensión de la banquisa veraniega alcanzaba unos 7 millones de kilómetros cuadrados. Desde 2007, la fusión del hielo marino ha aumentado de manera drástica. El 16 de septiembre de 2012 su extensión alcanzó un mínimo histórico: 3,4 millones de kilómetros cuadrados (*abajo*).



ESTUDIO DE VISUALIZACIÓN CIENTÍFICA DEL CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES DE LA NASA: BLUE MARBLE DATA, CORTESÍA DE RETO STÖCKLI

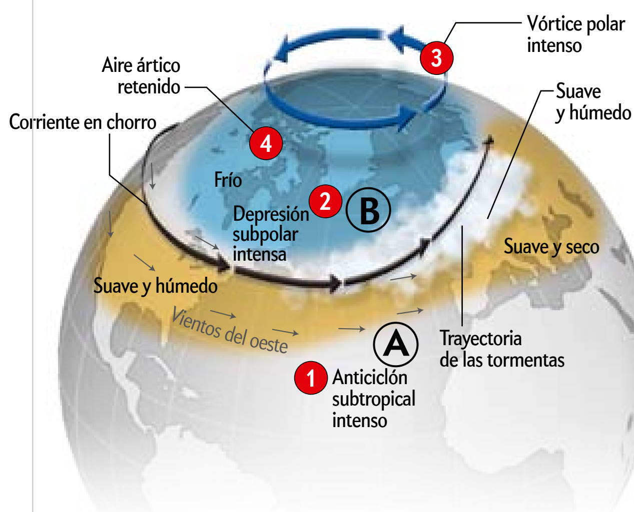
Tiempo meteorológico y clima

La Oscilación Ártica (AO) y la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) son dos fenómenos climáticos naturales que ejercen una notable influencia sobre los inviernos de EE.UU. y Europa. Ambas quedan caracterizadas por un índice que puede tomar valores positivos o negativos, por lo general de manera sincronizada (*abajo*). La drástica reducción de la banquisa ártica durante la época estival ha provocado alteraciones que favorecen las fases negativas de la AO y la NAO, ligadas a inviernos más fríos.

Las fases positivas de la AO y la NAO se caracterizan por un intenso centro anticiclónico (*A*) en los subtrópicos 1 y un potente centro de bajas presiones (*B*) en la región subártica 2. Un índice positivo de la AO se relaciona con un vórtice polar más vigoroso 3, el cual retiene grandes masas de aire frío 4 y permite que un aire más templado, procedente de latitudes meridionales, se adentre en el norte de EE.UU. y Europa. Bajo tales condiciones, la corriente en chorro y las tormentas cruzan el Atlántico con rumbo nordeste y transfieren humedad y temperaturas benignas al norte de Europa.

+ Oscilación Ártica

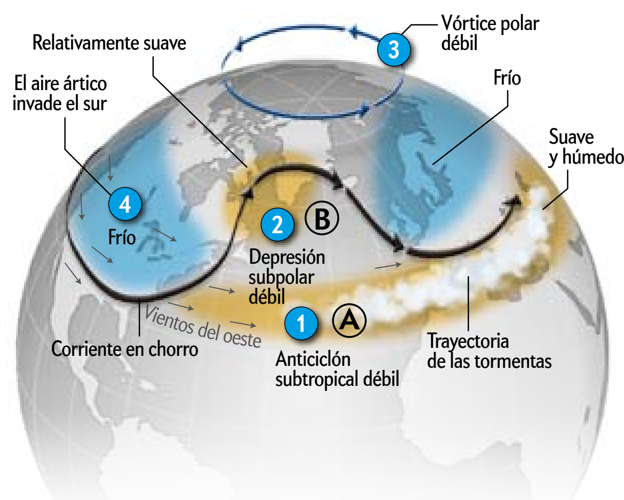
+ Oscilación del Atlántico Norte



Las fases negativas de la AO y la NAO conllevan una menor presión atmosférica en la región subtropical 1 y subártica 2. Un índice negativo de la AO se asocia a un vórtice polar debilitado 3, que permite al aire frío desplazarse hacia el sur 4. Cuando eso sucede, la corriente en chorro sigue una trayectoria más sinusoidal: alcanza el sur de la costa este estadounidense, vira hacia el norte hasta Groenlandia y vuelve a dirigirse hacia el sur, rumbo a Europa meridional. Sin embargo, las tormentas tienden a cruzar el Atlántico según una trayectoria más rectilínea y descargan su humedad sobre el sur de Europa.

− Oscilación Ártica

− Oscilación del Atlántico Norte



ciares continentales. Un fenómeno clave asociado a tales procesos es el mecanismo de retroalimentación que provoca la disminución del albedo del hielo: el agua congelada refleja grandes cantidades de radiación solar; a medida que se funde, la tierra y el mar se tornan más oscuros y, en consecuencia, aumenta el calentamiento de la superficie oceánica y continental [*véase* «Calentamiento global: ¿Más rápido de lo previsto?», por J. Carey; Investigación y Ciencia, enero de 2013].

La disminución del albedo en el océano Ártico despierta grandes preocupaciones entre los científicos. La pérdida de banquisa durante el verano expone una mayor superficie de agua a la luz solar. Al ser absorbida, esa radiación provoca un calentamiento excesivo de las aguas superficiales y desencadena dos mecanismos de retroalimentación: por un lado, una fracción del calor absorbido intensifica la fusión de la banquisa; por otro, el océano libera otra gran parte de esa energía térmica durante el otoño. Eso produce un aumento de la presión y la humedad atmosféricas sobre la región, al tiempo que disminuye la diferencia de temperaturas entre las latitudes polares y las medias.

Un aumento de la presión atmosférica en el Ártico y una atenuación del gradiente de temperaturas favorecen la aparición de fases negativas de la AO y la NAO durante el invierno, con lo que el vórtice polar y la corriente en chorro se debilitan. Un vórtice polar poco vigoroso encuentra más dificultades para retener las masas árticas de aire frío, las cuales contienen un alto porcentaje de humedad. En consecuencia, estas descienden hacia las latitudes medias, donde provocan olas de frío y un aumento de las nevadas. Por otro lado, una corriente en chorro atenuada presenta meandros más pronunciados, que pueden permanecer estancados y dejar atrapada una región bajo condiciones gélidas. Dichas alteraciones en los patrones de circulación atmosférica propician la aparición de olas de frío invernales más frecuentes y prolongadas en Norteamérica y Europa.

Existen además otros factores. El Niño, otra intensa fluctuación climática que actúa en el océano Pacífico, puede influir de manera considerable en la meteorología invernal de Estados Unidos. En el sudeste y en la región central de la costa atlántica del país, los episodios de El Niño provocan inviernos más

XNR PRODUCTIONS (*mapas*)

húmedos; por su parte, La Niña causa el efecto contrario. Si al fenómeno de El Niño se suman las fases negativas de la AO y la NAO, aumenta la probabilidad de padecer un invierno frío e inclemente en la costa este, como sucedió en la temporada 2009-2010. Las fases negativas de la AO y la NAO pueden también contrarrestar los inviernos secos y moderados que cabe esperar en los años de La Niña. Así ocurrió en 2010-2011, cuando unas temperaturas extremas y unas copiosas nevadas cayeron sobre Nueva York y Filadelfia, en manifiesta contradicción con los pronósticos que, basándose únicamente en los efectos de La Niña, habían augurado condiciones más benignas.

ESTE INVIERNO

A pesar de que los cambios en el Ártico pueden haber inclinado la balanza en favor de una mayor incidencia de olas de frío extremas durante el invierno, resulta imposible pronosticar con certeza cómo se repartirán las cartas cada año.

El invierno de la temporada 2011-2012 nos ofrece un buen ejemplo de las dificultades a las que se enfrentan tales previsiones. A la vista de la evolución de La Niña en el Pacífico, el CPC había vaticinado un invierno moderado en el este de Estados Unidos. De hecho, la AO y la NAO habían comenzado el invierno con índices positivos. Sin embargo, y aunque la NAO se mantuvo en una fase positiva, hacia mediados de enero el índice de la AO cambió de signo y tomó valores negativos hasta comienzos de febrero. Como resultado, Alaska y algunas regiones del centro y el este de Europa sufrieron un frío gélido e intensas tormentas de nieve. Entre tanto, el tiempo en el este de EE.UU. parecía ajeno a la estación invernal: un anticiclón en el Pacífico Oriental asociado a La Niña había alterado la trayectoria de la corriente en chorro y, a su paso por Norteamérica, esta se había desviado hacia latitudes más septentrionales de las que son habituales cuando el índice de la AO toma valores negativos a mediados de invierno. En consecuencia, el calor procedente del golfo de México penetró en el este de EE.UU. y regaló a la región el cuarto invierno más cálido desde que se tienen registros. El desplazamiento hacia el norte de la corriente en chorro causó asimismo unas condiciones más suaves en el Atlántico Norte y el oeste de Europa.

A comienzos de marzo, el sistema anticiclónico en el Pacífico Oriental se intensificó, lo que acentuó unas condiciones meteorológicas ya de por sí excepcionales y elevó las temperaturas hasta valores récord en el este y medio oeste de Estados Unidos. A pesar de la persistencia de un calor que no correspondía a la época del año, otras áreas del hemisferio norte experimentaron un invierno inusitadamente frío y un adelanto de la primavera. De hecho, el Centro Nacional de Datos Climáticos de EE.UU. informó de que la temperatura media global de marzo en 2012 había sido la más fría desde 1999.

En cuanto a la temporada de 2012-2013, las condiciones parecen jugar a favor de la aparición de olas de frío intensas en Norteamérica y Europa. El deshielo sin precedentes que ha experimentado la banquisa ártica durante el último verano debería incrementar las probabilidades de que las masas de aire frío de la zona invadan las latitudes medias. Aunque resulta difícil predecir qué regiones se mostrarán más vulnerables, el episodio de El Niño que tuvo lugar en el Pacífico durante el pasado otoño podría aumentar la posibilidad de que el este de EE.UU. se enfrente antes o después a una ola de frío intenso. La costa oriental podría resultar particularmente vulnerable al azote de las nefastas tormentas del nordeste, que llevan aparejadas temperaturas muy bajas e intensas nevadas.

Aunque nadie puede predecir con certeza si aún sufriremos algún episodio tan extremo como los acaecidos en 2009 y 2010, las condiciones que se han venido gestando durante el verano y el otoño pasados se asemejan más a las de 2009 que a las de cualquier otro año desde 2007, cuando tuvo lugar un notable incremento del deshielo de la banquisa ártica. Cuando llegue la primavera, podremos comprobar cómo se han repartido las cartas.

ENIGMA RESUELTO

¿Qué ocurrió el invierno pasado?

En 2012, unas condiciones atmosféricas inusuales derivaron en una extraña combinación de frío extremo y temperaturas benignas en EE.UU. y Europa. ¿Por qué? En general, las fases de la AO y la NAO suelen hallarse sincronizadas; sin embargo, el año pasado no sucedió así: aunque ambas comenzaron el invierno con valores positivos, la AO cambió de signo entre mediados de enero y comienzos de febrero. Como resultado, el aire ártico invadió el centro y el este de Europa, dejando a su paso un frío intenso y nieve. Al mismo tiempo, la combinación de una fase negativa de la AO y el desarrollo de La Niña en el Pacífico acarreó temperaturas muy bajas y nevadas copiosas en Alaska. Por otro lado, La Niña causó que la corriente en chorro se desplazase hacia el norte a su paso por EE.UU., lo que permitió que el aire cálido procedente del golfo de México invadiera el este del país.

PARA SABER MÁS

Climate drives sea change. Charles H. Greene y Andrew J. Pershing en *Science*, vol. 315, págs. 1084-1085, 23 de febrero de 2007.

The recent Arctic warm period. J. E. Overland, M. Wang y S. Salo en *Tellus*, vol. 60, n.º 4, págs. 589-597, 2008.

An Arctic wild card in the weather. Charles H. Greene y Bruce C. Monger en *Oceanography*, vol. 25, n.º 2, págs. 7-9, 2012.

Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitude. Jennifer A. Francis y Stephen J. Vavrus en *Geophysical Research Letters*, vol. 39, n.º L06801, 17 de marzo de 2012.

ASTROFÍSICA

El observatorio in

Un telescopio espacial de grandes dimensiones para estudiar el universo frío

Paolo Saraceno y Anna di Giorgio

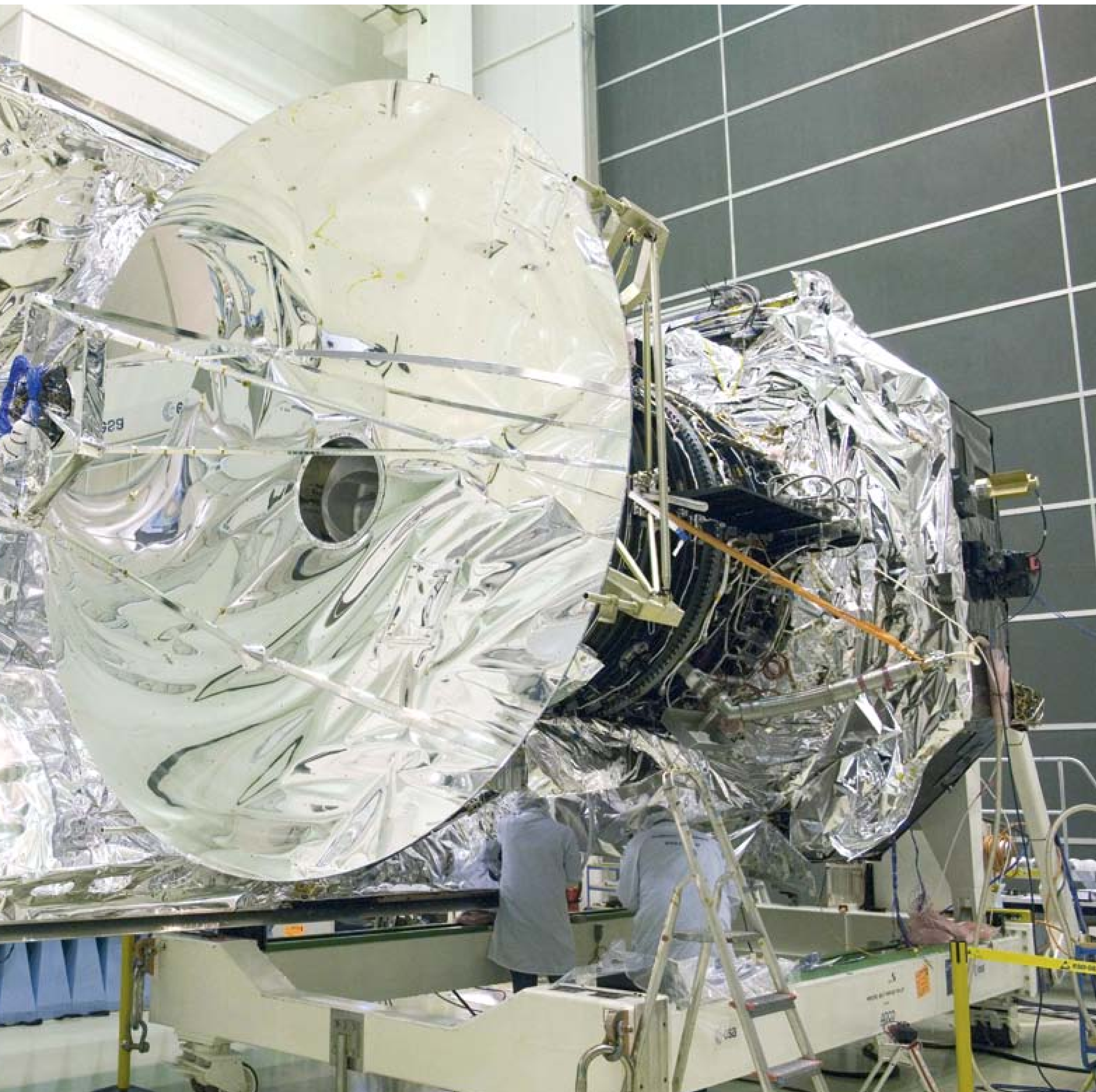


CORTESÍA DE LA ESA

El observatorio espacial Herschel, una de las misiones de mayor calado de la Agencia Espacial Europea, ha sido diseñado para escudriñar el universo en frecuencias infrarrojas y submilimétricas. Equipado con un telescopio de 3,5 metros de diámetro y con tres sensores refrigerados a temperaturas cercanas al cero absoluto, Herschel fue lanzado el 14 de mayo de 2009 en un cohete Ariane 5 desde la base de Kourou, en la Guayana francesa. Unos 50 días después llegaba a las inmediaciones del segundo punto de Lagrange del sistema Tierra-Sol, situado a unos 1,5 millones de kilómetros de nuestro planeta, desde donde lleva más de tres años transmitiendo datos de calidad extraordinaria.

Durante su período de funcionamiento (se prevé que la misión finalice en marzo de este año), Herschel ha cosechado todo tipo de resultados de gran relevancia en áreas tan dispares como el estudio de los objetos más lejanos del sistema solar, los procesos de formación de estrellas, la evolución de las galaxias o la química del medio interestelar. Dos tercios de su tiempo de observación han sido asignados a distintos grupos investigadores a través de una selección de propuestas abierta a la comunidad científica internacional. Otra parte se ha dedicado a los proyectos clave de la misión: programas observacionales a gran escala que abordan de manera global investigaciones de particular importancia científica.

frarrojo Herschel



El observatorio debe su nombre al astrónomo, físico y músico británico Sir William Herschel. Nacido en Alemania en 1738, se trasladó muy joven a Gran Bretaña, donde en el año 1800 descubriría la radiación infrarroja. Para entender cómo se repartía la energía de la luz solar entre los diferentes colores del espectro, Herschel la descompuso con ayuda de un prisma y midió su temperatura por medio de un termómetro colocado sobre cada color. Al situar el instrumento por debajo del rojo, donde la vista no percibía color alguno, el científico comprobó que también en aquella zona se registraban temperaturas superiores a la ambiente, por lo que dedujo que a esos puntos debía llegar energía. Dada su posición con respecto al resto de los colores, Herschel bautizó aquella luz invisible con el nombre de radiación infrarroja.

Paolo Saraceno, físico experimental y experto en formación estelar, trabaja en el Instituto de Astrofísica y Planetología Espacial (IAPS), del Instituto Nacional de Astrofísica italiano. Ha coordinado la participación italiana en la construcción del Observatorio Espacial Infrarrojo y del Herschel.

Anna di Giorgio, investigadora del IAPS, es experta en instrumentación espacial. Ha participado en el diseño y la construcción de los sensores del telescopio Herschel y coordina la participación italiana en la fase operativa.



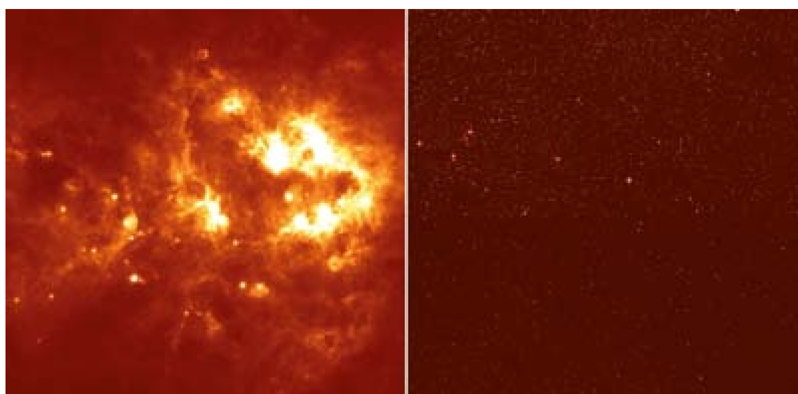
¿POR QUÉ EL INFRARROJO?

Resulta natural asociar los conceptos de color y temperatura. Un herrero o un maestro vidriero no usan termómetro, pero pueden hacerse una buena idea de la temperatura del material con el que trabajan a partir del color de la luz que este emite. Del mismo modo, la luz azul de una llama nos indica que esta posee una temperatura mayor que el filamento amarillo de una bombilla; el cual, a su vez, se encontrará más caliente que una resistencia eléctrica de la que emana un tono rojizo. En general, la escala de temperaturas sigue la de los colores del arcoíris: los objetos más calientes emiten luz azulada; los más fríos, rojiza. Aquellos que se encuentran a temperaturas aún menores radian en el infrarrojo.

La ley que relaciona temperatura y color se conoce como ley de desplazamiento de Wien. Esta determina la longitud de onda a la que un cuerpo (en rigor, un cuerpo negro) emite la máxima energía. La superficie de una estrella como el Sol, que se encuentra a 6000 grados Kelvin, radia con un espectro cuyo máximo se encuentra en torno a los 0,5 micrómetros, lo que corresponde a la luz visible. El cuerpo humano, con una temperatura media de 37 grados Celsius, emite con un máximo que ronda los 10 micrómetros; es decir, en el infrarrojo, lo cual explica la existencia de instrumentos militares encargados de detectar este tipo de radiación. Casi todos los objetos cuya temperatura se halla por debajo de los 3000 grados Kelvin, incluso aquellos con temperaturas muy cercanas al cero absoluto, radian la mayor parte de su energía en la región infrarroja del espectro. Por tanto, en ella quedan incluidas las emisiones de objetos tan dispares como las gigantes rojas, las nubes de polvo interestelar, los planetas, los cometas y los asteroides.

Pero la importancia del infrarrojo en astronomía obedece, además, a otro fenómeno: la dispersión de la luz, que provoca que la radiación, al toparse con un obstáculo de dimensiones similares a su longitud de onda, se propague en direcciones diferentes a la de incidencia. A ello se debe el color rojizo de los atardeceres: dado que las partículas de la atmósfera tienden a dispersar en mayor grado la luz azul que la rojiza, durante el ocaso, la primera se difunde por todo el cielo, mientras que la segunda atraviesa la atmósfera sin problemas. El mismo proceso tiene lugar en el espacio, donde las longitudes de onda largas presentan una mayor facilidad para atravesar las nubes interestelares de gas y polvo. El infrarrojo y las ondas de radio se muestran especialmente penetrantes, por lo que resultan de una utilidad enorme para revelar lo que dichas nubes esconden en su interior.

Los objetos calientes del universo emiten la mayor parte de su radiación en el ultravioleta y en el visible. Pero, si se encuentran inmersos en una nube interestelar, esos fotones se dispersarán por el medio hasta que acaben siendo absorbidos por este. De esta manera, las partículas de gas y polvo se calientan hasta alcanzar temperaturas que van desde algunos grados Kelvin a unas pocas decenas de ellos y, después, reemiten la energía absorbida



Gafas de visión infrarroja: La imagen izquierda muestra una región del plano galáctico situada a unos 15.000 años luz de la Tierra tal y como fue registrada por Herschel a una longitud de onda de 160 micrómetros. Las manchas más brillantes radian con una luminosidad total equivalente a unas 10.000 veces la del Sol. A la derecha, la misma región en el óptico, donde solo pueden apreciarse algunas estrellas al fondo.

CORTESÍA DE LA ESA

EN SÍNTESIS

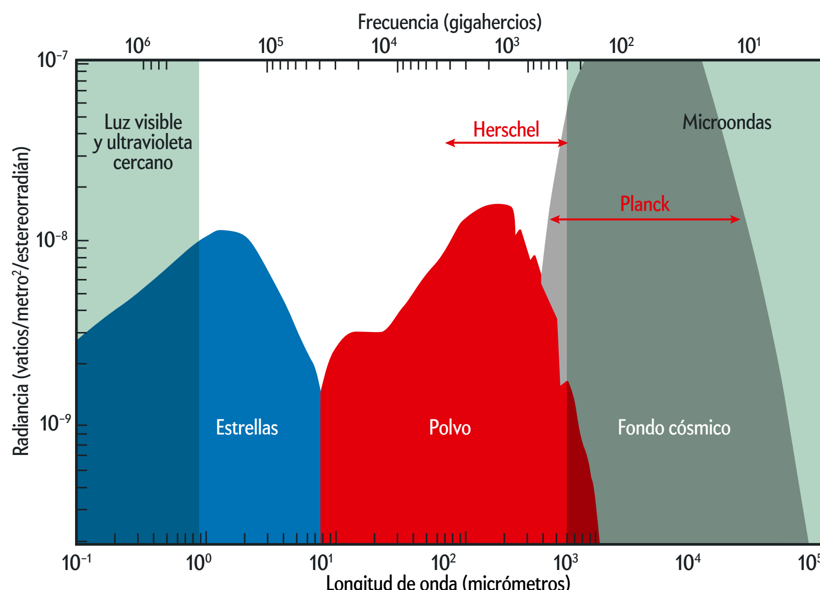
El observatorio espacial Herschel, de la Agencia Espacial Europea, estudia el universo en frecuencias infrarrojas y submilimétricas con una resolución espacial nunca alcanzada con anterioridad.

La radiación infrarroja permite estudiar fenómenos y objetos imposibles de observar con otros medios, como los procesos de formación estelar, el universo frío o las galaxias más antiguas del cosmos.

La construcción del observatorio Herschel ha batido varios récords. Entre otros, la misión posee el mayor telescopio jamás puesto en órbita y los receptores infrarrojos más sensibles jamás construidos.

INTERVALOS DE OBSERVACIÓN

La gran ventana infrarroja



La energía radiada por todos los procesos que han tenido lugar en el universo desde la gran explosión puede dividirse en dos grandes grupos: la emitida directamente por los objetos que pueblan el cosmos (*azul*) y la radiada a altas frecuencias, absorbida por las nubes interestelares y reemitida después en el infrarrojo (*rojo*). A modo de comparación, la gráfica incluye también la cantidad de energía contenida en el fondo cósmico de microondas (*gris*), así como los intervalos de observación de los satélites Herschel y Planck (este último, también de la ESA, se dedica al estudio de la radiación del fondo cósmico de microondas).

El área roja ha sido medida por los satélites ISO, de la ESA, y COBE, de la NASA. Estos, sin embargo, no gozaban de la resolución espacial necesaria para distinguir objetos individuales, algo solo posible con un telescopio de gran tamaño. Herschel fue construido para solventar esta deficiencia.

en el infrarrojo. Dado que la dispersión de la radiación disminuye a medida que aumenta su longitud de onda, cuanto más densa sea una nube, más se desplazará hacia el infrarrojo lejano la luz que emana de ella. Por ello, algunos objetos celestes que generan grandes cantidades de energía pero que, sin embargo, se hallan ocultos por grandes nubes de gas y polvo, presentan su máximo de emisión en longitudes de onda comprendidas entre los 100 y los 300 micrómetros, un intervalo que coincide con el centro de las bandas observadas por el Herschel.

En líneas generales, al menos dos tercios de toda la radiación producida desde el comienzo del universo posee longitudes de onda superiores al micrómetro. Por tanto, sin instrumentos que observen en esta banda jamás podremos entender en su totalidad los procesos que dominan el cosmos. Pero, además, la radiación infrarroja es la única que permite estudiar ciertos fenómenos, como los procesos de formación estelar (oscurecidos por las mismas nubes de gas y polvo a partir de las cuales se forman las estrellas) o las galaxias más antiguas del universo. Por tanto, esta radiación reviste una importancia fundamental para escudriñar tanto el universo actual como su evolución pasada.

INSTRUMENTACIÓN DE A BORDO

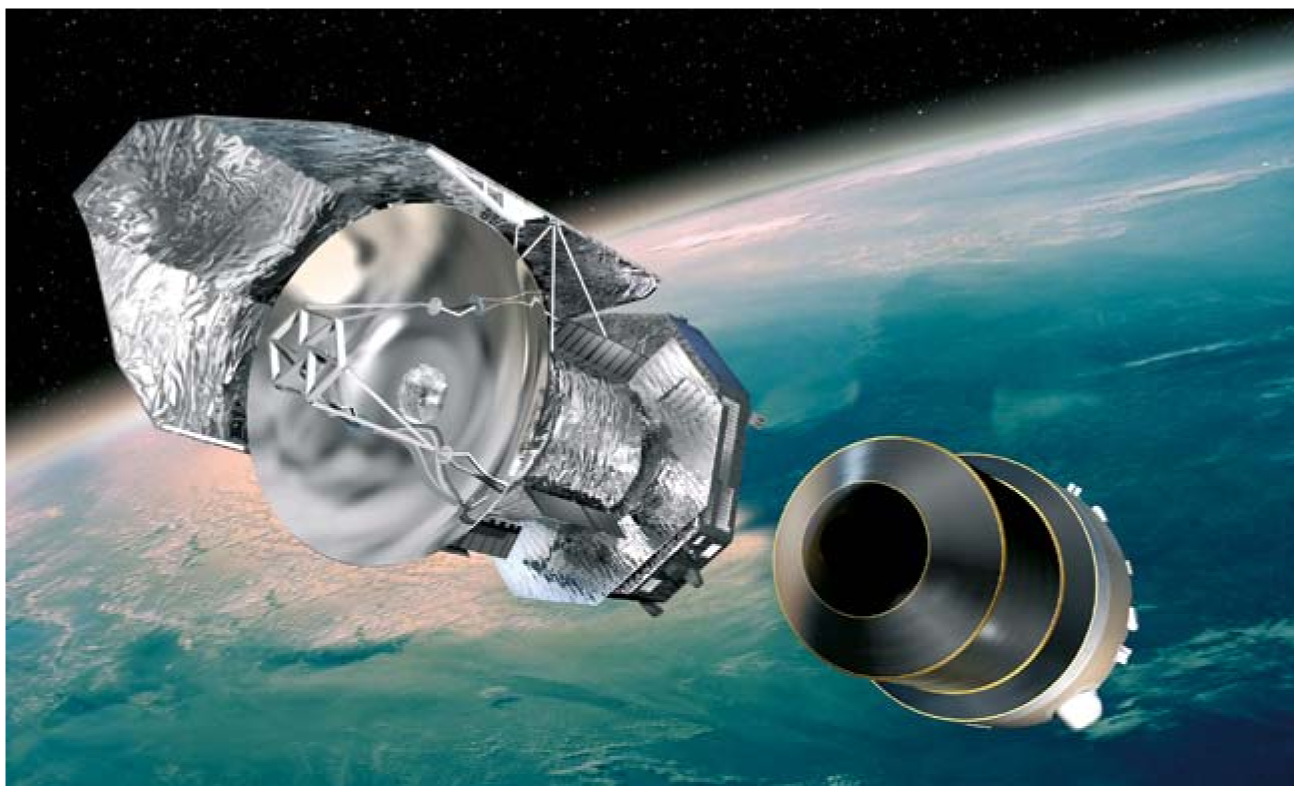
La astronomía infrarroja ha experimentado un desarrollo tardío por varias razones. Por un lado, fue solo a partir de los años sesenta del siglo pasado cuando comenzaron a construirse detectores con la sensibilidad adecuada. Pero, además, obtener datos en las bandas en las que observa Herschel requiere realizar las mediciones desde el espacio, ya que gran parte de dicha radiación es absorbida por las moléculas presentes en la atmósfera terrestre (en particular, por el vapor de agua). Por último, los instrumentos deben refrigerarse a temperaturas cercanas al cero absoluto —algo difícil de lograr en un satélite—, a fin de evitar que su sensibilidad se vea limitada por su propia emisión térmica.

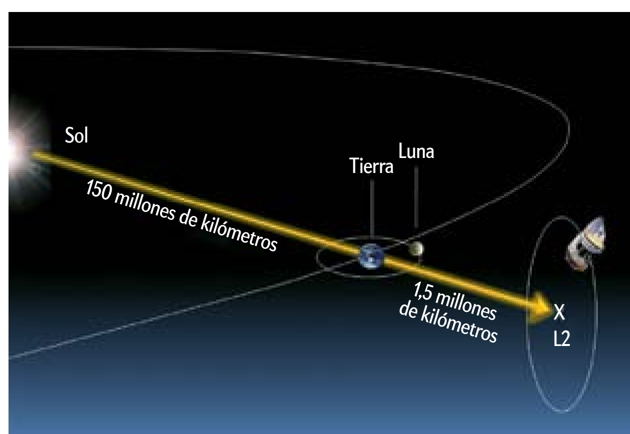
Otra dificultad a la que se enfrenta la astronomía infrarroja procede de los fenómenos de difracción de la luz, los cuales limitan la resolución espacial de un telescopio (la capacidad del instrumento para distinguir dos objetos muy cercanos entre sí).



Ojo gigante: El espejo primario del telescopio de Herschel ha sido fabricado en carburo de silicio, un material cerámico muy ligero y de excelentes cualidades ópticas y térmicas. Con un diámetro de 3,5 metros, se trata del mayor espejo puesto jamás en órbita.

CORTESÍA DE LA ESA (*espejo*); FUENTE (*gráfico*): «THE COSMIC INFRARED BACKGROUND RESOLVED BY SPITZER: CONTRIBUTIONS OF MID-INFRARED GALAXIES TO THE FAR-INFRARED BACKGROUND», H. DOLE ET AL., EN *ASTRONOMY & ASTROPHYSICS*, VOL. 451, PÁGS. 417-429, 2006





¿Dónde se encuentra? **El observatorio espacial Herschel orbita alrededor del segundo punto de Lagrange del sistema Tierra-Sol (L_2), situado a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra. En el siglo XVIII, Joseph Louis Lagrange demostró que un objeto emplazado en dicho punto conservaría su posición relativa con respecto a ambos astros. Herschel orbita a unos 700.000 kilómetros de L_2, en torno al cual completa una vuelta cada 178 días. Su posición angular con respecto al Sol y la Tierra (las principales fuentes de radiación) permanece fija.**

CORTESÍA DE LA ESA (*ilustración del Herschel*); PAOLO SARACENO (*segundo punto de Lagrange*)

Debido a tales efectos, la mínima separación angular que puede resolver un telescopio resulta proporcional al cociente entre la longitud de onda y el diámetro del instrumento; por lo que, si se desea conservar una resolución determinada, las dimensiones del telescopio deben aumentar en la misma proporción que lo hace la longitud de onda en la que se realizan las observaciones. A este problema se han enfrentado en el pasado el satélite COBE, de la NASA, y el Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO), de la ESA: a pesar de gozar de una elevada sensibilidad, sus pequeñas dimensiones limitaban su resolución espacial.

Una baja resolución repercute, además, en la sensibilidad de las mediciones. Aunque un instrumento posea la sensibilidad necesaria para observar galaxias muy débiles, no podrá distinguirlas si en su campo visual se interponen otras más brillantes pero imposibles de resolver. La probabilidad de que ello suceda define el «ruido de confusión» de las medidas, un fenómeno que muestra hasta qué punto puede aumentar la sensibilidad de un telescopio sin más que incrementar su resolución espacial; es decir, el diámetro del telescopio.

El observatorio Herschel fue diseñado teniendo en mente las consideraciones anteriores. A bordo lleva un telescopio Cassegrain con un espejo primario de 3,5 metros, el mayor jamás puesto en órbita y el más grande que pueden transportar los cohetes disponibles en la actualidad. A fin de aumentar sus dimensiones al máximo, se decidió no colocar el telescopio en un sistema criogénico, sino dejar que se enfriase por irradiación —dada la baja temperatura del espacio exterior— hasta unos 85 grados Kelvin (198 grados Celsius bajo cero). A dicha temperatura, el ruido debido a la emisión térmica del espejo resulta equiparable al ruido de confusión, por lo que refrigerar el espejo aún más no habría ofrecido grandes ventajas en las medidas fotométricas; menos aún si, para introducirlo en un contenedor criogénico, hubiese sido necesario reducir su diámetro.

Herschel mide 7,5 metros de alto, 4 de ancho y pesa unas 3,3 toneladas. El espejo primario del telescopio, alojado en la parte superior, ha sido fabricado en carburo de silicio, un material cerámico con extraordinarias cualidades ópticas, térmicas y, sobre todo, muy ligero: apenas pesa 300 kilogramos, frente a los 900 del espejo de 2,4 metros del telescopio espacial Hubble. Bajo el espejo, en el plano focal, se encuentra un gran criostato con tres instrumentos enfriados a unos 8 grados Kelvin para



Corazón técnico: El módulo de servicio, localizado en la parte inferior del satélite, incluye todos los instrumentos y sistemas electrónicos que operan a temperatura ambiente.

reducir su emisión térmica. En su interior, los receptores han sido refrigerados a algunas décimas de kelvin para aumentar su sensibilidad.

Los tres instrumentos del Herschel observan en longitudes de onda comprendidas entre los 57 y los 671 micrómetros. Dos de ellos, SPIRE y PACS, obtienen imágenes fotométricas con sensores similares a los que emplean las cámaras digitales comerciales, si bien en el infrarrojo y con una sensibilidad mucho mayor. Dichas imágenes gozan de la máxima resolución espacial compatible con el diámetro del telescopio (desde 5 segundos de arco a 60 micrómetros, hasta 35 segundos de arco a 500 micrómetros). El tercer instrumento, HIFI, se encarga de realizar mediciones espectroscópicas de muy alta resolución espectral, para lo cual dispone del primer heterodino construido para operar a dichas frecuencias (un dispositivo que acopla la radiación infrarroja entrante a una señal interna a fin de generar una señal amplificada y de frecuencia intermedia, más fácil de analizar).

La construcción de estos tres instrumentos ha supuesto décadas de trabajo por parte de los mejores institutos de investigación europeos y estadounidenses, así como una inversión conjunta de unos 300 millones de euros. Una inversión científica y tecnológica que, sin duda, habrá merecido la pena.

PARA SABER MÁS

Handbook of infrared astronomy. I. S. Glass. Cambridge University Press, 1999.
Hidden universe. L. L. Christensen, R. Fosbury y R. L. Hurt. Wiley-VCH, 2008.
Los últimos avances y el estado de la misión Herschel pueden consultarse en: **http://herschel.esac.esa.int/latest_news.shtml**

ASTROFÍSICA

El universo invisible de Herschel

Los datos enviados por el observatorio infrarrojo de la Agencia Espacial Europea han permitido estudiar con un detalle sin precedentes las galaxias lejanas, las nubes protoestelares y la química del medio interestelar

Paolo Saraceno

CORTESÍA DE LA ESA/PROGRAMA HI-GAL

EN SÍNTESIS

La gran resolución del observatorio infrarrojo Herschel ha proporcionado una ingente cantidad de datos a la comunidad astronómica internacional.

Su capacidad para atisbar en el interior de las nubes moleculares ha permitido estudiar las distintas fases de los procesos de formación estelar.

Sus espectrómetros han analizado la química del medio interestelar, donde se cree que se originaron las primeras moléculas prebióticas.

Paolo Saraceno, físico experimental y experto en formación estelar, trabaja en el Instituto de Astrofísica y Planetología Espacial (IAPS), del Instituto Nacional de Astrofísica italiano. Ha coordinado la participación italiana en la construcción del Observatorio Espacial Infrarrojo y del Herschel.



Hoy sabemos que, lejos de ser un lugar estático, el universo se encuentra en continua evolución. Los grandes avances que han experimentado las técnicas observacionales han hecho posible entender los procesos de formación de estrellas y galaxias, así como reconstruir su evolución a lo largo de la historia cósmica. Para estudiar el pasado, los astrónomos reciben ayuda de su particular «maquina del tiempo»: dado que la luz se propaga a una velocidad finita, cuando observamos una galaxia que se encuentra a mil millones de años luz, la imagen que vemos no refleja su aspecto actual, sino el que dicha galaxia presentaba hace mil millones de años, cuando fue emitida la luz que hoy llega hasta la Tierra.

Al estudiar galaxias situadas a distancias dispares —y, por tanto, pertenecientes a distintas épocas de la historia cósmica—, podemos reconstruir el camino que va desde los primeros átomos que se formaron tras la gran explosión hasta el universo actual. Este tipo de medidas solo se ven limitadas por dos factores: la sensibilidad de los instrumentos, la cual determina a qué distancia se encuentran las galaxias más lejanas que podemos observar, y su resolución espacial, o la capacidad para distinguir entre dos objetos próximos. Al aumentar la sensibilidad crece el número de galaxias lejanas que podemos ver; las cuales, sin embargo, aparecerán más próximas en nuestro campo visual.

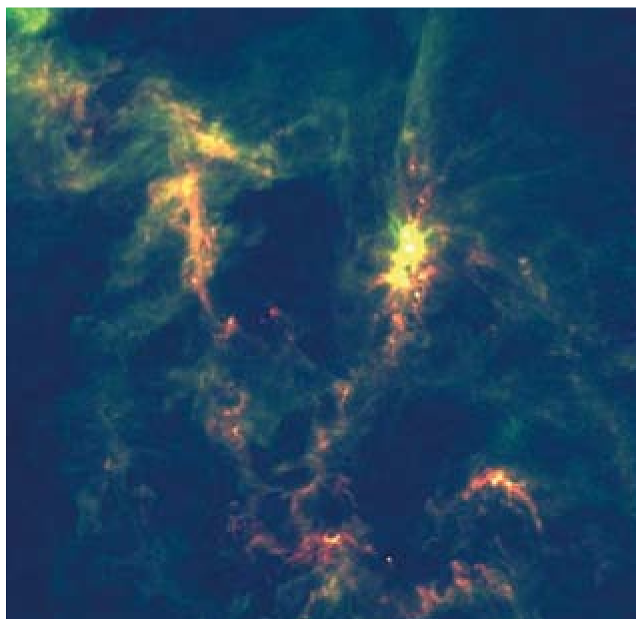
Desde hace algunos años sabemos que gran parte de los procesos que rigen la evolución del universo se ocultan tras nubes de polvo, impenetrables a la luz visible; de ellas procede más de la mitad de la radiación generada después de la gran explosión. Dado que estos objetos emiten la mayor parte de su energía en el infrarrojo lejano, la Agencia Espacial Europea decidió hace unos años invertir importantes recursos en la construcción del telescopio espacial Herschel, una misión para estudiar el universo pasado —y futuro— en esta región del espectro electromagnético.

Polvo de estrellas: Esta imagen de la región de Vulpécula, en el plano de la Vía Láctea, se ha obtenido combinando las imágenes de dos de los instrumentos de Herschel: PACS, que ha observado a 70 micrómetros (*azul*) y a 160 micrómetros (*verde*), y SPIRE, a 250 micrómetros (*rojo*). Las áreas que debido a los intensos procesos de formación estelar se encuentran a mayor temperatura aparecen más azules. Las nubes de polvo frías se muestran en rojo.

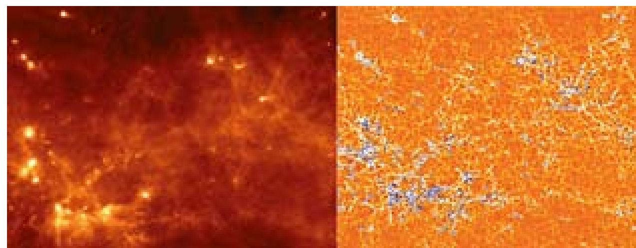
GALAXIAS PERDIDAS

Hace tiempo que los astrónomos se afanan por hallar galaxias cada vez más distantes. En un principio, esta búsqueda se llevó a cabo con telescopios ópticos, ya fuese desde tierra o desde el espacio, pues se pensaba que la cantidad de polvo presente en el universo no bastaría para absorber todas las emisiones de estos objetos en el espectro visible. Sin embargo, esas galaxias nunca aparecieron, lo que dio lugar al problema de las «galaxias perdidas».

Ese enigma fue resuelto a finales del decenio de los noventa gracias al Observatorio Espacial Infrarrojo (el predecesor de Herschel, lanzado por la ESA en 1995) y a varios telescopios milimétricos terrestres. Estos instrumentos descubrieron gran cantidad de galaxias que, aunque eran invisibles en el óptico, podían observarse con algunas dificultades en las bandas milimétricas y se mostraban hiperluminosas en el infrarrojo. Un ejemplo nos lo proporciona el cúmulo de galaxias Abell 1835. Las medidas en el óptico habían registrado un pico debido a una galaxia situada en el centro del cúmulo; sin embargo, las medidas en bandas milimétricas detectaron una fuente adicional, 30 veces más luminosa y cuyo máximo rondaba los 100 micrómetros.



Núcleos brillantes y filamentos: La región de formación estelar NGC 1333, en la constelación de Perseo, se encuentra a unos 815 años luz de la Tierra. Esta imagen en falsos colores se ha obtenido combinando las tomas a 70 micrómetros (*azul*), 160 (*verde*) y 250 micrómetros (*rojo*) del telescopio Herschel. La estructura filamentosa de la nube resulta evidente.



Dos por uno: A la izquierda, la imagen a 250 micrómetros de una región en el plano galáctico obtenida con el instrumento SPIRE para el proyecto Hi-GAL. En ella se distinguen al menos seis protocúmulos a distancias comprendidas entre 6500 y 19.500 años luz. A la derecha, la misma imagen filtrada numéricamente para destacar la luminosidad de los filamentos. Los puntos corresponden a los núcleos más densos.

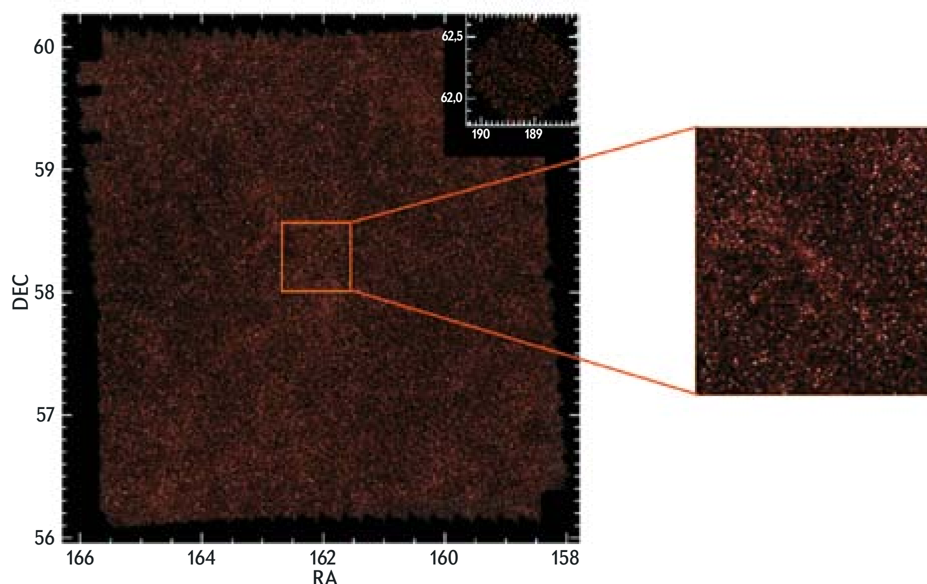
En los mismos años, las observaciones realizadas por el Explorador del Fondo Cósmico (COBE), lanzado por la NASA en 1989, permitieron deducir la existencia de un gran número de galaxias invisibles en el óptico pero muy luminosas en el infrarrojo. Sin embargo, debido al reducido diámetro del COBE, este carecía de la capacidad para resolver objetos individuales. Dado que la emisión de tales galaxias debía dar cuenta de la mitad de la energía electromagnética radiada después de la gran explosión, los astrónomos concluyeron que el polvo debió haberse formado muy pronto, junto con las primeras estrellas, de tal suerte que habría oscurecido la mayor parte de la evolución de las galaxias. Ello dejó patente que las galaxias «perdidas» debían buscarse en el infrarrojo y que, dada su alta densidad en el cielo, sería necesario disponer de un instrumento con una elevada resolución angular, como Herschel.

El telescopio Herschel ha dedicado una cantidad de tiempo considerable al estudio de esas galaxias perdidas. Durante el primer año de observación, dos de sus tres instrumentos de a bordo, PACS y SPIRE, fotografiaron el uno por ciento de la esfera celeste en cinco bandas (70, 160, 250, 350 y 500 micrómetros), gracias a lo cual se logró, por vez primera, resolver casi por completo las fuentes individuales. Aquellas imágenes revelaron una miríada de puntos luminosos, cada uno de ellos correspondiente a una galaxia. En algunos casos, su resolución angular se ha visto incrementada gracias al efecto de lente gravitacional (la desviación de los rayos de luz que se produce cuando, en su camino hacia la Tierra, la luz pasa cerca de algún cuerpo muy masivo y se amplifica la intensidad de la señal). Gracias a las observaciones en el infrarrojo ha sido posible resolver objetos débiles y muy lejanos que, en el óptico, ni siquiera el potente telescopio espacial Hubble puede detectar.

Por otro lado, los espectrómetros del observatorio Herschel permiten estimar la velocidad a la que las galaxias se alejan de nosotros como consecuencia de la expansión del universo, tanto mayor cuanto más alejadas se encuentran. Para estudiar las galaxias más cercanas pueden usarse las líneas espectrales; en el resto de los casos, se emplean las características del espectro continuo. De esta manera se han descubierto galaxias situadas a más de 12.000 millones de años luz de nosotros, tan antiguas que pueden considerarse casi como recién nacidas. Su luminosidad, miles de veces mayor que la de la Vía Láctea, se debe, sobre todo, a la gran cantidad de estrellas en formación que albergan. En el futuro habremos de entender los procesos que condujeron a la formación de galaxias tan masivas y luminosas en épocas tan próximas a la gran explosión. La historia que estas galaxias aún han de revelarnos probablemente resulte de importancia fundamental para reconstruir la evolución del universo.

CRIADEROS ESTELARES

Entender la cadena de procesos que llevan al nacimiento de una estrella constituye otra de las grandes cuestiones abiertas en astrofísica. Es durante la formación del astro cuando se determina el valor del parámetro que más influirá en su evolución posterior: su masa. A medida que aumenta la masa de una estrella, se incrementa su luminosidad y se reduce su esperanza de vida. Asimismo, su temperatura interna crece con la masa, lo que per-



Una miríada de galaxias: **Gracias a los instrumentos PACS y SPIRE, Herschel ha identificado un ingente número de galaxias invisibles en el óptico. La imagen de mayor tamaño muestra una región del cielo de unos 4 grados de lado, según fue registrada por SPIRE a 250 micrómetros. A la derecha, un detalle de unos 30 minutos de arco. Cada uno de los puntos luminosos que en él aparecen corresponde a una galaxia. Cada una contiene cientos de miles de millones de estrellas.**

FUENTE: «SUBMILLIMETRE GALAXIES RESIDE IN DARK MATTER HALOES WITH MASSES GREATER THAN 3 × 10¹¹ SOLAR MASSES», DE AMBLARD ET AL. EN *NATURE*, VOL. 470, PÁG. 510, 2011; ESA-SPIRE

mite la síntesis de elementos más y más pesados a partir de las reacciones nucleares que se desencadenan en el seno del astro. Mientras que el Sol únicamente produce helio y carbono, una estrella cinco veces más masiva brillará con una luminosidad 300 veces mayor y sintetizará todos los elementos químicos hasta el hierro. La génesis de elementos aún más pesados tiene lugar en las estrellas que, debido a su descomunal tamaño, acabarán sus días explotando como supernovas.

La relación que describe la distribución de una población de estrellas atendiendo a la masa con la que el astro comienza a quemar hidrógeno recibe el nombre de «función inicial de masa». Si bien es conocida, hasta ahora solo ha podido establecerse por medios empíricos. Desentrañar la física que se esconde tras ella nos permitiría entender mejor a qué velocidad cambian las galaxias, qué elementos químicos producirán y, a la postre, la evolución del universo.

En los últimos años, las medidas realizadas por el Observatorio Espacial Infrarrojo, el telescopio infrarrojo Spitzer y otras observaciones en ondas de radio han permitido atisbar en el interior de las nubes de polvo y, con ello, profundizar en los mecanismos de formación estelar. En un primer momento, el polvo y el gas procedentes de estrellas pasadas se condensan en nubes poco densas, transparentes en el visible y observables también en las bandas de radio. Después, en ellas se desencadenará un proceso de colapso gravitatorio que reducirá su volumen en un factor de 10^{10}. En cuanto a la densidad, esta se incrementará desde unas 10 o 100 moléculas por centímetro cúbico hasta valores que pueden alcanzar los 10^{24} átomos por centímetro cúbico en el interior estelar.

Para condensarse en una o más estrellas, la nube debe perder el enorme momento angular que acumula durante la fase de contracción, lo cual se logra mediante un proceso de fragmentación en nubes menores. Por tanto, las estrellas nacen en protocúmulos que incluyen decenas, cientos o miles de ellas, lo cual explica que muchas de las que observamos hoy en el firmamento formen parte de sistemas estelares múltiples. La función inicial de masa queda determinada en esta fase. Una vez creados, los núcleos densos que componen el protocúmulo evolucionarán como sistemas aislados y se convertirán en protoestrellas en torno a las cuales se formará un disco de materia. Al menos en el caso de aquellas similares al Sol, dicho disco dará lugar a sistemas planetarios. Hasta la llegada del telescopio Herschel, el proceso de fragmentación de la nube nunca había sido estudiado con tanto detalle, pues no existían instrumentos con la capacidad de observar el interior de las nubes y resolver las componentes individuales del protocúmulo.

Otro ejemplo de los descubrimientos realizados por el observatorio europeo nos lo proporciona la región de formación estelar NGC 1333, sita a 815 años luz en la constelación de Perseo. Gracias a los instrumentos PACS y SPIRE, que pueden detectar en un mismo campo tanto fuentes muy débiles como otras hasta mil veces más luminosas, Herschel observó, por vez primera, estructuras filamentosas que se extendían entre núcleos más densos; es decir, entre aquellas zonas en las que se estaba produciendo el colapso gravitatorio.

La existencia de filamentos de ese tipo resultó aún más patente en el estudio de varios protocúmulos situados en una región del plano galáctico mucho más alejada de la Tierra que la anterior. Allí, el instrumento SPIRE registró variaciones de luminosidad (lo que indica cambios en la densidad, en la temperatura o en ambas) que revelaban la existencia de una gran estructura filamentosa, como si de una gigantesca telaraña se tratase. En ella se apreciaban núcleos densos, correspondientes a las zonas en las que estaban teniendo lugar los procesos de formación estelar, separados entre 6500 y 19.500 años luz. Dichos núcleos se encontraban sobre los filamentos y se apiñaban en las regiones en las que estos se cruzaban, lo que parece indicar que desempeñan una función relevante en el colapso de las nubes interestelares. La disposición alargada de los filamentos indica que estas estructuras no se encuentran muy ligadas por la acción de la gravedad (ya que, de lo contrario, exhibirían una geometría más esférica) y que, por tanto, preceden a la formación de los núcleos densos. Los filamentos probablemente aparezcan como resultado de una acción combinada de la gravedad, campos magnéticos estelares y turbulencia. Entender los mecanismos que llevan a su formación y evolución podría aportar la pieza clave para desentrañar el origen de la función inicial de masa.

Por último, las medidas fotométricas de los instrumentos PACS y SPIRE permiten determinar la energía emitida por cada una de las fuentes individuales, a partir de la cual puede estimarse la masa y la temperatura de la nube. Cuando la misión finalice, Herschel habrá estudiado miles de objetos de este tipo en el

interior de protocúmulos de diversa composición y situados a distancias muy dispares, lo que permitirá llevar a cabo análisis estadísticos. En este contexto, la única incógnita que quedará en el tintero será la manera en que los discos protoplanetarios se convierten en sistemas planetarios. El estudio de tales procesos requerirá realizar observaciones con una resolución angular mayor que la de Herschel, la cual se logrará gracias a los interferómetros espaciales del próximo decenio.

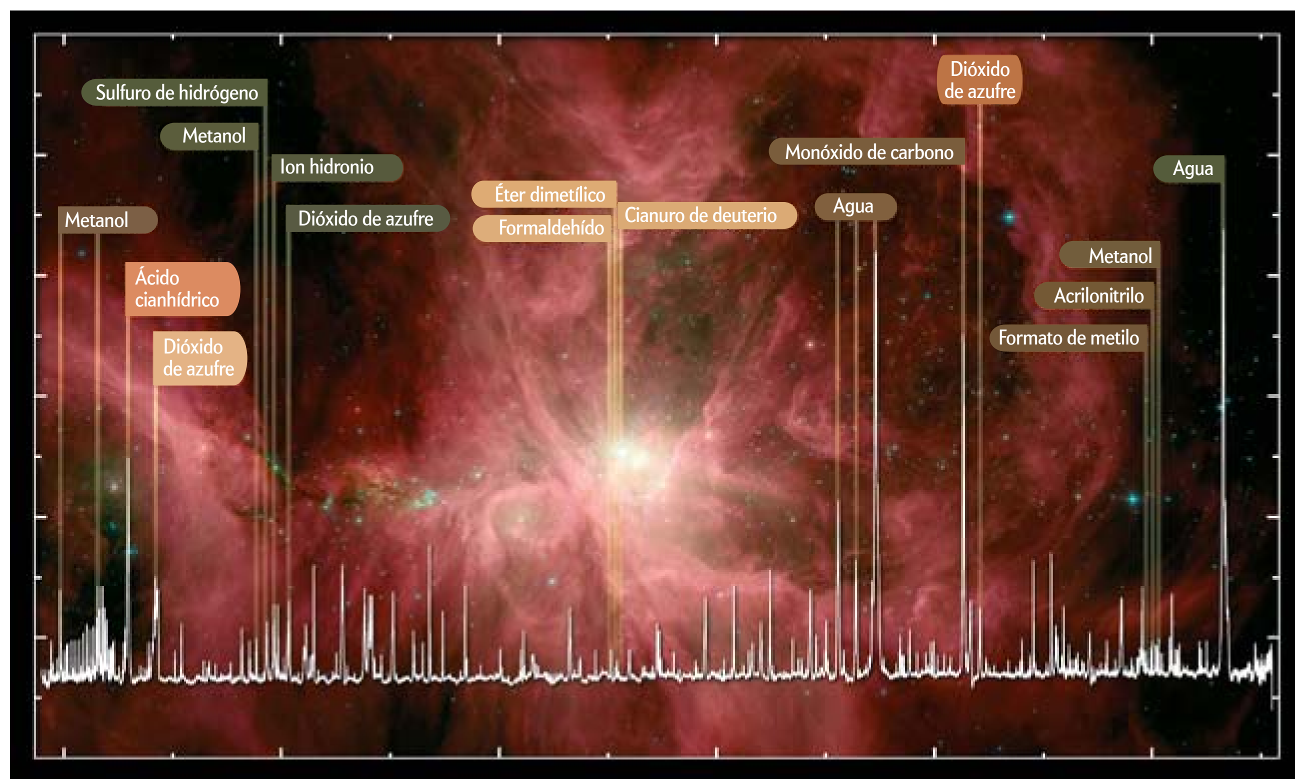
ESPECTROSCOPÍA

Cada tipo de átomo o molécula emite y absorbe luz a frecuencias características, las cuales sirven a modo de «huella dactilar» que permiten identificar las diversas especies químicas a partir de la luz que captan o radian. Ello brinda a la astronomía un método formidable para deducir la composición, condiciones físicas y velocidad de un objeto lejano. A partir de la intensidad de las líneas espectrales puede obtenerse la temperatura y densidad del gas que las emite, así como la intensidad de la radiación que incide sobre él. Por otro lado, el desplazamiento de las líneas por efecto Doppler permite averiguar la velocidad a la que la materia se acerca o se aleja de nosotros.

Aunque el estudio de espectros atómicos en astronomía se remonta al siglo XVIII, las primeras líneas moleculares (de los radicales cianógeno, CN, y metino, CH) no fueron observados hasta 1937. El descubrimiento causó sorpresa, ya que se pensaba que los compuestos moleculares no sobrevivirían en el espacio exterior a causa del continuo bombardeo de los rayos cósmicos y de la radiación ultravioleta. A raíz de esas primeras medidas nació el estudio de la gran variedad de reacciones químicas que pueden desencadenarse en condiciones extremas: a densidades hasta miles de millones de veces menores que el más alto vacío jamás alcanzado en la Tierra, y a temperaturas que abarcan desde unos pocos grados Kelvin, características del medio interestelar, hasta los miles de grados que reinan en las atmósferas estelares. Dada la enorme diferencia con respecto a las condiciones que pueden recrearse en los laboratorios terrestres, hablamos de procesos completamente distintos de aquellos que rigen las reacciones químicas que nos son familiares. De hecho, a ellos podría deberse la síntesis de las moléculas responsables de la existencia de vida en el universo.

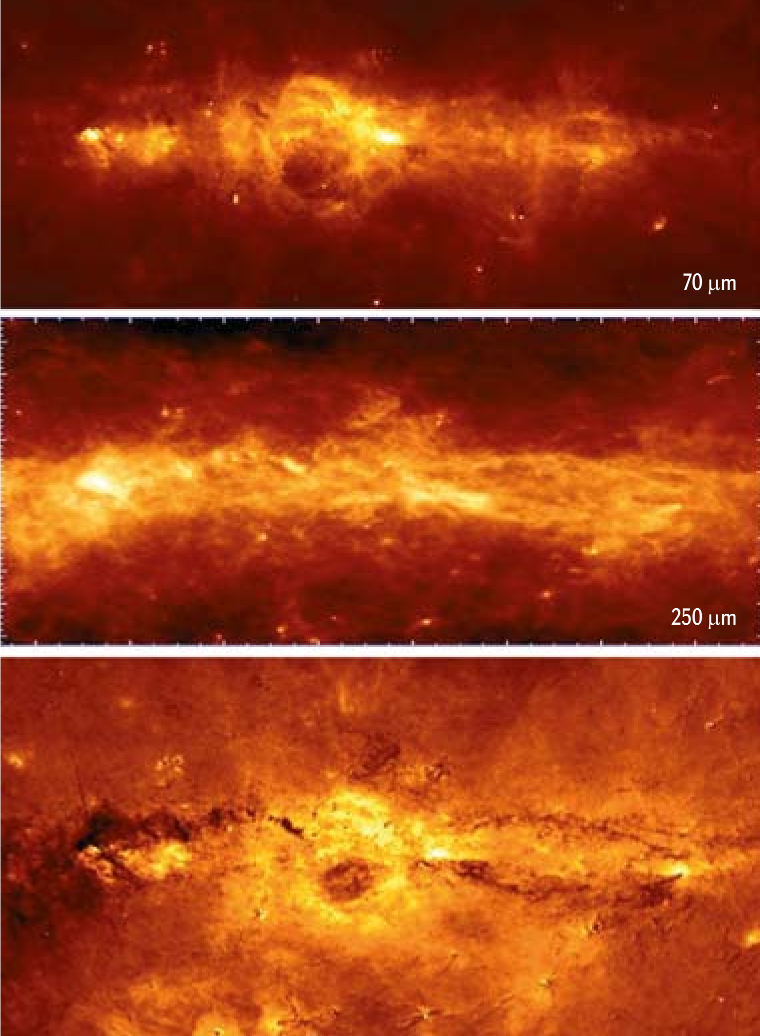
Uno de los resultados espectrométricos más relevantes logrados por Herschel, obtenido gracias al instrumento HIFI, corresponde al estudio de la nebulosa de Orión, un criadero estelar situado a unos 1500 años luz de la Tierra. Su espectro presenta miles de líneas. Algunas de ellas indican la presencia de moléculas conocidas (agua, monóxido de carbono, el grupo hidroxilo, formaldehído, metanol, éter dimetílico, ácido cianhídrico, monóxido y dióxido de azufre u oxígeno molecular); otras, sin embargo, no han sido identificadas aún. Se prevé que un gran número de ellas correspondan a especies nunca antes documentadas en el medio interestelar. Otro ejemplo interesante de los espectros obtenidos por Herschel, esta vez gracias a los instrumentos PACS y SPIRE, es el de la gigante roja VY Canis Majoris, una estrella que ha llegado al final de sus días y que se encuentra expulsando materia hacia el medio interestelar, como hará el Sol dentro de 5000 millones de años. Después, esta se condensará en nebulosas similares a la de Orión para formar nuevas generaciones de estrellas.

Los espectrómetros de Herschel han detectado líneas atómicas y moleculares más allá de los confines de nuestra galaxia.



El espectro de la nebulosa de Orión obtenido con el instrumento HIFI de Herschel. Algunas de las líneas moleculares corresponden a compuestos conocidos; otras no habían sido observadas con anterioridad. Al fondo, una imagen de la nebulosa obtenida con el observatorio espacial Spitzer, de la NASA.

CORTESÍA DE LA ESA/HEXOS; CONSORCIO HIFI (*espectro de la nebulosa de Orión*)



Un vistazo insólito a nuestra galaxia: Esta imagen de 2 × 1 grados muestra el centro de la Vía Láctea a 70 micrómetros (*arriba*) y a 250 micrómetros (*centro*). Las diferentes bandas han permitido reconstruir una termografía (*abajo*) de la región, gracias a la cual ha sido posible identificar un gran anillo de polvo frío que gira alrededor del centro de nuestra galaxia.

CORTESÍA DE LA ESA/PROGRAMA HI-GAL

Un ejemplo lo hallamos en la galaxia infrarroja hiperluminosa Markarian 231, a 600 millones de años luz de la Tierra, obtenido gracias al instrumento SPIRE. La gran cantidad de energía que emiten las galaxias de este tipo se debe a dos procesos: una intensa formación estelar, por un lado, y la acreción de materia en sus agujeros negros supermasivos, que en las galaxias de esta clase pueden alcanzar masas que superan los mil millones de masas solares (en comparación, el agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea posee una masa de «solo» tres millones de masas solares). Ambos procesos exhiben características propias, las cuales pueden ser diferenciadas y cuantificadas por Herschel.

El espectro de un objeto tan lejano y rico en líneas jamás había sido observado en el infrarrojo lejano. El gas de Markarian 231 se encuentra a temperaturas muy elevadas, como consecuencia del gran número estrellas muy luminosas en proceso de formación y del bombardeo de rayos X, como cabe esperar de la presencia del agujero negro supermasivo. El análisis Doppler de las líneas de hidroxilo y agua ha demostrado que existen flujos muy energéticos de material que se expande a más de mil kilómetros por segundo. Este fenómeno podría explicar el origen de las galaxias elípticas muy masivas y carentes de polvo que se observan en nuestra época: tal vez constituyan el remanente de las galaxias hiperluminosas una vez que dichos flujos de materia hayan barrido todo el polvo y gas, lo que frenaría los procesos de formación estelar. Ello habría reducido su luminosidad y habría perfilado las estructuras elípticas actuales.

Los estudios espectrales realizados por Herschel nos ayudarán a entender la química compleja que reina en la Vía Láctea y otras galaxias a distancias que en el pasado se consideraban insondables. Aún se necesitarán años de estudios en búsqueda de nuevas moléculas y procesos químicos; pero, tal vez, el secreto del origen de la vida nos sea revelado algún día en el interior de las gélidas nebulosas del medio interestelar.

EL CENTRO GALÁCTICO

Algunas de las imágenes más espectaculares de la misión Herschel han sido obtenidas por el proyecto Hi-GAL, coordinado por Italia. Este se propone cartografiar el plano galáctico de la Vía Láctea en las bandas de 70, 160, 250, 350 y 500 micrómetros, empleando para ello los instrumentos PACS y SPIRE en paralelo. Entre otros resultados, Herschel ha obtenido una imagen del centro galáctico a 70 micrómetros (la longitud de onda con mayor resolución espacial y la más sensible a la emisión de materia caliente) y a 250 micrómetros.

En el centro de nuestra galaxia se encuentra una intensa fuente de radio, Sagitario A, y un agujero negro de tres millones de masas solares. Dicha fuente, que coincide con el punto más caliente de la región, aparece como una mancha luminosa a 70 micrómetros, pero desaparece en la banda de 250 micrómetros, sensible a la materia más fría. A su lado se observa una cavidad de 45,7 años luz de diámetro, visible a 70 micrómetros, producida por la explosión de una o más supernovas que han barrido la materia presente en el área. Un borde luminoso indica la zona hasta donde ha llegado el frente de choque de la explosión, el cual comprime y calienta la materia interestelar, a la par que alimenta el nacimiento de nuevas estrellas. La cavidad desaparece en la imagen a 250 micrómetros, sensible a las emisiones de la materia más fría y que, por tanto, puede detectar la materia del plano galáctico que se encuentra detrás de la cavidad.

Los datos correspondientes a diferentes «colores» han permitido calcular la temperatura de cada punto y, por tanto, obtener una termografía de la zona. Esta revela la existencia de un anillo deformado de polvo frío y de 293,6 años luz de diámetro, el cual gira en torno al centro de la galaxia y que, proyectado sobre el plano ortogonal a la línea de vista, adopta la forma de un ocho invertido.

Análisis como los anteriores nos dan una idea de la cantidad extraordinaria de información que se encuentra al alcance del observatorio espacial Herschel; entre otros, la distribución de polvo de la galaxia, sus regiones de formación estelar, las estrellas más antiguas y los remanentes de supernova. En ellos se halla escrita la historia de nuestra galaxia, así como los fenómenos a gran escala que regirán su evolución futura.

PARA SABER MÁS

The formation of stars. S. W Stahler y F. Palla. Wiley & Sons, 2004.
The physics and chemistry of the interstellar medium. A. G. G. M. Tielens. Cambridge University Press, 2005.
Il caso Terra. P. Saraceno. Mursia, 2007.

Lee A. Groat trabaja desde 1988 en la Universidad de Columbia Británica, donde enseña geología y oceanografía y dirige el programa de Ciencias Integradas. Es asesor y miembro del equipo directivo de algunas compañías de prospección minera canadienses y codirige una consultora geológica.



MINERALOGÍA

Gemas

Con su rareza, las piedras preciosas suponen una valiosa fuente de información para los geólogos que investigan la dinámica interna del planeta

Lee A. Groat

DURANTE MILENIOS, LAS GEMAS SE HAN CONSIDERADO OBJETOS PRECIADOS EN RAZÓN de su brillo y esplendor. Se cotizan por el color, el brillo, la transparencia, la durabilidad y el alto valor en relación a su pequeño volumen. Debido a que la explotación de numerosas gemas se consigue con operaciones bastante sencillas, de bajo coste y en regiones remotas de países en vías de desarrollo, es difícil obtener estadísticas precisas sobre su producción y valía. Con todo, sabemos que la producción mundial de diamantes brutos en 2008 se cifró en 12.700 millones de dólares; en 2001, *Colored Stone*, revista del sector, estimó que el comercio mundial de piedras preciosas alcanzaba 6000 millones de dólares al año. Existen ya variedades sintéticas de muchas gemas, pero no gozan todavía de una repercusión significativa en el mercado internacional.

La elevada cotización de las piedras preciosas radica, en parte, en su rareza. Un yacimiento típico de diamantes produce 5 gramos de gemas por millón de gramos de material extraído; de ellos, solo el 20 por ciento posee la calidad deseada en joyería. Al igual que el petróleo, el proceso de formación de las gemas puede abarcar un dilatado período de tiempo geológico. La datación radiométrica de inclusiones microscópicas en diamantes revela edades comprendidas entre 970 y 3200 millones de años. Consecuentemente, la tasa de extracción de gemas de alta calidad es muy superior a la de su formación y, por tanto, suponen un recurso limitado. Por ejemplo, una mina de esmeraldas que comenzó a operar en 1981 en Santa Terezinha, Brasil, produjo un pico de 25 toneladas de material bruto, que fue valorado en 9 millones de dólares en 1988; en 2000, el mismo tonelaje se vendió por 898.000 dólares. En razón de esa misma escasez, los geólogos les conceden un valor muy significativo. La formación de yacimientos de gemas requiere condiciones geológicas excepcionales. El interés en desentrañar la historia de unas circunstancias tan insólitas ha suscitado un creciente número de investigaciones geológicas en torno a las gemas y su origen.

Existe un amplio elenco de piedras preciosas. Entre las más conocidas y de mayor importancia destacan el diamante, rubí, zafiro, esmeralda y otras variedades gema del berilo, crisoberilo, tanzanita, tsavorita, topacio y jade. (Otras gemas a las que no se hará referencia en nuestro artículo son el ámbar, amatista, calcedonia, granate, lazurita, malaquita, ópalo, peridoto, rodonita, espinela, turmalina, turquesa y circón.)

DIAMANTE

El diamante es la fase cristalina del carbono que se origina a presiones muy elevadas. La más cotizada entre las gemas, ciertas piezas excepcionales se venden a medio millón de dólares por quilate (1 quilate = 0,2 gramos); algunas superan los 20 millones de dólares.

La región de Golconda, en la zona central del sur de India, constituyó la principal zona productora de diamantes durante siglos, hasta que se descubrieron nuevos yacimientos en Brasil, en el siglo XVIII, y en Kimberley, Sudáfrica, en 1866. En la actualidad, los tres productores de diamantes de mayor importancia, en términos de valor, son Botsuana, Rusia y Canadá, aunque cuentan también con una producción notable Angola, Australia, Congo, Lesoto, Namibia, Sierra Leona y Sudáfrica.

El diamante cristaliza en el sistema cúbico. Sus átomos de carbono se disponen en celdas cuyos ejes cristalográficos son de longitud idéntica (0,356 nanómetros) y perpendiculares entre sí. Dicha ordenación se manifiesta en diversidad de formas: octaedros, cubos, cubo-octaedros y agregados menos regulares. El diamante puede presentar ciertas propiedades físicas distintivas, como la luminiscencia bajo exposición a luz ultravioleta o rayos X. Se recurre a la fluorescencia de rayos X para extraer los diamantes y distinguirlos de la ganga. Las gemas emiten luz visible cuando se exponen a luz ultravioleta o rayos X, porque la radiación absorbida por los defectos cristalinos provoca la oscilación de sus electrones entre distintos niveles de energía; como resultado, se libera energía en forma de luz. (Las gemas, sometidas a tratamientos previos de calentamiento o radiación, así como cualquier material sintético o falso, emiten fluorescencia en longitudes de onda diferentes, razón por la cual esa propiedad se utiliza para identificar ejemplares reales.)

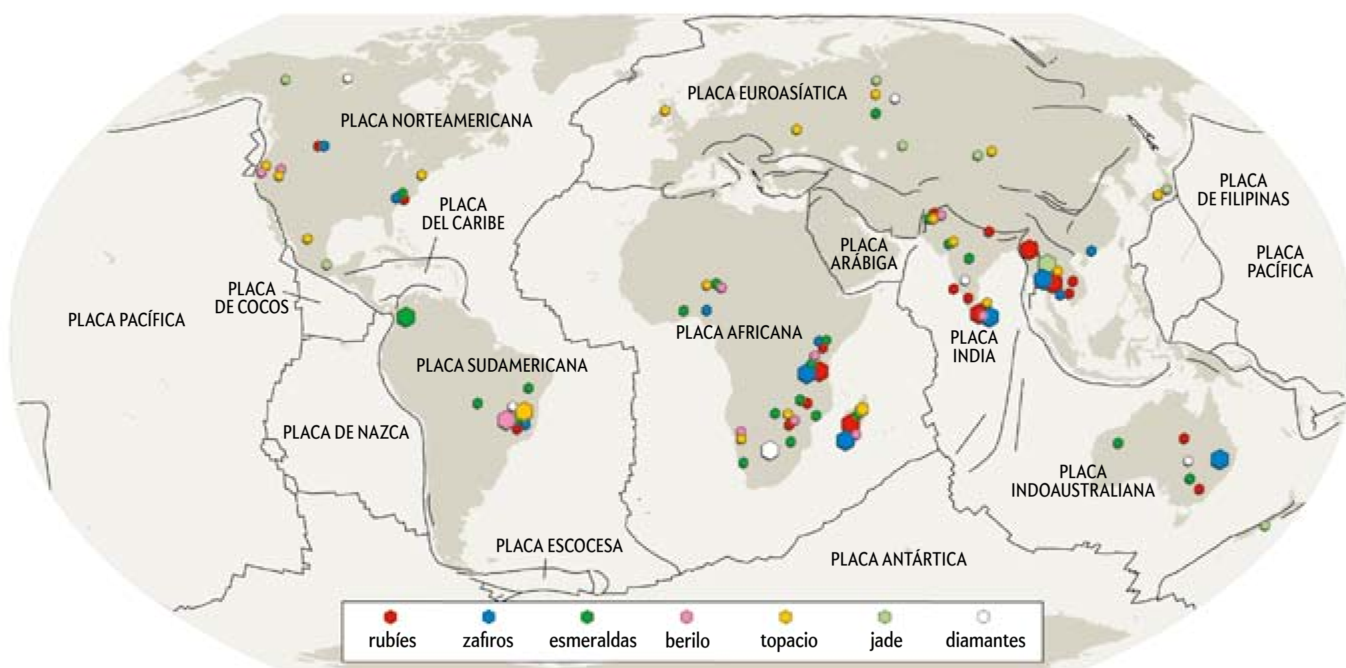
Los diamantes se clasifican según la presencia o ausencia de nitrógeno y boro en su red cristalina y según la organización estructural de dichas impurezas en la misma. Los diamantes de tipo I contienen una cantidad significativa de nitrógeno, que puede detectarse por espectrometría de absorción de infrarrojos (un método que detecta la clase de longitudes de onda absorbidas o emitidas por una muestra, ya que cada elemento guarda correlación con una longitud de onda característica). En los diamantes de tipo II, la cantidad de nitrógeno es insignificante.

El color de los diamantes naturales se atribuye principalmente a la sustitución de otros elementos por nitrógeno y a otros defectos relacionados con deformaciones físicas de la red cristalina; una misma muestra acostumbra presentar más de un defecto generador de color.

Los diamantes de tipo I cuyas impurezas de nitrógeno se encuentran agrupadas suelen ser incoloros, marrones o amarillos; cuando las impurezas se encuentran distribuidas por todo el cristal, los diamantes adoptan coloraciones amarillas, naranjas o marrones. Los diamantes de color rosa, rojo y violeta pertenecen también al tipo I; su coloración se debe a que la región cristalina donde se alojan las impurezas sufrió una deformación posterior a la formación de la gema. Los diamantes de tipo II

Un diamante en bruto todavía incrustado en la roca encajante, una kimberlita, que lo arrastró hasta la superficie. Fue en Sudáfrica. El cristal se formó a gran profundidad, hace millones o miles de millones de años. Cualquier variedad gema es poco común, lo que explica su alta consideración, pues su formación requiere una combinación de factores geológicos muy singulares. Los geólogos valoran la información que las piedras preciosas proporcionan sobre la dinámica interna del planeta.

JOEL AREM, PHOTO RESEARCHERS, INC.



Los yacimientos de piedras preciosas se distribuyen por toda la superficie del planeta. El tamaño de cada símbolo representa la importancia económica de las gemas en una región determinada. Las gemas se asocian frecuentemente con zonas de actividad tectónica o volcánica, aunque algunos yacimientos pueden localizarse en regiones donde no existen signos de magmatismo.

contienen escasas o ninguna impureza de nitrógeno pero pueden presentar impurezas de boro, que típicamente confieren al diamante una coloración azul o gris. En caso de no presentar ninguna impureza, los diamantes son incoloros o marrones.

Las inclusiones minerales en el interior de los diamantes permiten calcular las presiones y temperaturas correspondientes a su ambiente de formación. Generalmente, los diamantes cristalizan a profundidades comprendidas entre 135 y 200 kilómetros y a temperaturas entre 1100 y 1200 °C. La mayoría se genera en el interior de la litosfera (la capa rígida que engloba la corteza terrestre y la porción más externa del manto superior), bajo las áreas más antiguas y estables de la corteza continental denominadas cratones (regiones situadas en el interior de las placas tectónicas, alejadas de las zonas de crecimiento o subducción). El resto se forma en regiones sublitosféricas que pueden alcanzar las profundidades del manto inferior. Se considera que dichas regiones corresponden a raíces profundas de antiguos cratones, donde estas masas relativamente frías han atenuado la energía geotérmica y, por tanto, se reúnen las condiciones necesarias de cristalización. En ese dominio, empobrecido en sílice, predominan la peridotita o la eclogita, rocas enriquecidas en hierro y magnesio.

Los diamantes bien cristalizados responden a dos procesos principales: por un lado, la reducción (ganancia de electrones) del carbonato oxidado (CO_3^{2-}), tanto en estado sólido como disuelto en un magma o en un fluido enriquecido en especies químicas; por otro, la oxidación (pérdida de electrones) del carbono reducido en forma de metano. La cristalización, en ambientes asociados a un magma o a un fluido, permite el crecimiento cristalino sin restricciones físicas.

El carbonato que se reduce para formar diamantes suele presentarse en forma de dolomita [$CaMg(CO_3)_2$] o magnesita ($MgCO_3$). Algunos investigadores sostienen que el carbonato deriva del carbono introducido en el manto cuando las especies volátiles, como el CO_2, se liberan de la corteza oceánica cuando esta subduce bajo otra placa tectónica y penetra en una región de roca fundida.

Por otro lado, el metano que se oxida para dar lugar a diamantes parece proceder de fluidos reducidos del manto superior que producen reacciones metasomáticas (causadas por fluidos acuosos) en las regiones litosféricas subcratónicas, donde se crean los diamantes. No obstante, el verdadero origen del carbono de los diamantes no es evidente y se halla abierto a la investigación.

De acuerdo con los modelos de evolución del manto, los diamantes con edades superiores a los 2500 millones de años se generaron probablemente por oxidación de metano, mientras que los de edades inferiores derivan, en su mayoría, de los pro-

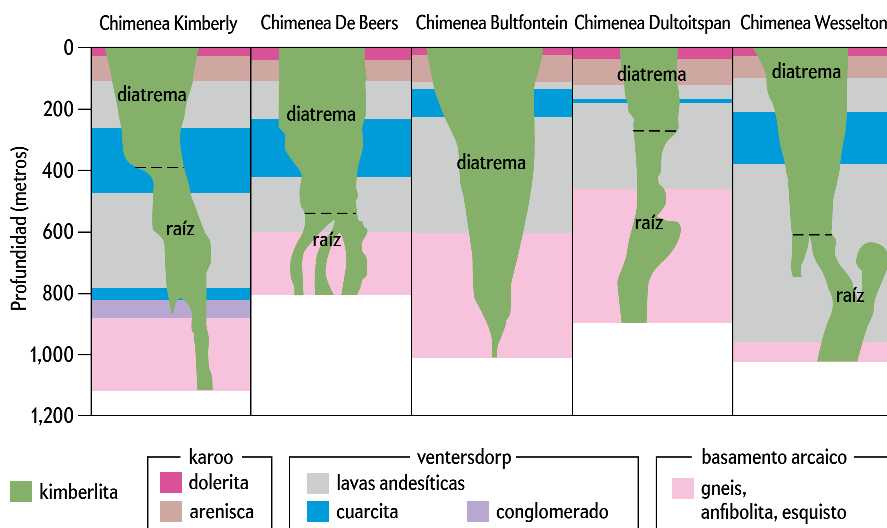
EN SÍNTESIS

La formación de yacimientos de gemas requiere condiciones geológicas excepcionales. El interés en desentrañar la historia de tan insólitas circunstancias ha suscitado un creciente número de investigaciones geológicas.

El presente artículo se centra en las propiedades, distribución y origen geológico de algunas de las piedras preciosas más conocidas y de mayor importancia: diamante, rubí, zafiro, esmeralda y otros tipos de berilo, crisoberilo, tanzanita, tsavorita, topacio y jade.

La localización y descubrimiento de nuevos yacimientos se realiza hoy mediante imágenes de satélite, fotografías aéreas, prospección geoquímica y otras técnicas modernas de prospección gemológica.

AMERICAN SCIENTIST



Tanto las chimeneas kimberlíticas que arrastraron los diamantes hasta la superficie, como las formaciones rocosas que atraviesan, han sido cartografiadas en cinco minas en Kimberley, Sudáfrica. Los diamantes se hallan en las zonas de diatrema.

cesos de reducción de carbonato. La datación radiométrica determina la edad de un material que se ha desintegrando naturalmente a lo largo del tiempo geológico. El método se basa en el análisis de la proporción entre distintos isótopos. Las dataciones de diamantes se obtienen a partir del estudio de las inclusiones minerales de silicatos y sulfuros que cristalizaron al mismo tiempo que el diamante que los aloja. Sin embargo, se ha demostrado que los análisis de las inclusiones dispuestas en planos expuestos de fracturación de un cristal ponen fecha a la erupción que arrastró los diamantes hasta la superficie, pero no datan necesariamente la formación de los mismos.

Con independencia de la profundidad de su formación, los diamantes son arrastrados con rapidez hasta la superficie, transportados en cuerpos magmáticos que ascienden veloces (kimberlitas o lamproítas) y que se originan en la misma región donde se crearon los diamantes, si no a profundidades mayores. El magma puede resultar corrosivo para el diamante, por lo que se requiere una velocidad de ascenso determinada para asegurar la preservación de las gemas. Las kimberlitas ascienden a una velocidad entre 10 y 30 kilómetros por hora; una rápida liberación de dióxido de carbono y agua le confiere mayor flotabilidad. Ese mecanismo de liberación no se descubrió hasta las recientes investigaciones de James K. Russell y sus colaboradores, de la Universidad de Columbia Británica. En sus experimentos a altas temperaturas, el equipo de Russell demostró que la liberación no responde a una disminución de presión, sino al ascenso del magma desde una región rica en carbono hasta otra rica en sílice (una característica propia de los cratones, que a su vez corrobora la asociación de los diamantes con estas regiones). El aumento en el contenido en sílice del magma supone una disminución brusca de la solubilidad de dióxido de carbono, lo que conlleva una continua y vigorosa expulsión del gas y comporta la ascensión del magma kimberlítico.

La edad de las kimberlitas suele oscilar entre 65 y 135 millones de años, pero algunas pueden alcanzar los 1100 millones de años. Sin embargo, no son tan antiguas como los diamantes que transportan. Excepto en determinados casos, los diamantes se forman mucho antes de que tenga lugar la erupción de kimberlitas o lamproítas, con diferencias de cientos a miles de millones de años. A pesar de que la edad de las erupciones de kimberlitas diamantíferas es variable, gran parte de los yacimientos de mayor interés económico corresponden a cuerpos kimberlíticos que no superan los 1600 millones de años. Las dataciones radiométricas revelan que las erupciones kimberlíticas han sido cada vez más frecuentes a lo largo del tiempo; algunas de las más recientes corresponden a las asociaciones de kimberlitas eocenas (desde hace 56 a 34 millones de años) de la región Lac de Gras, en los Territorios del Noroeste de Canadá. Los yacimientos de diamantes de edades superiores a los 1600 millones de años pertenecen a paleoplaceres (sedimentos generados por separación gravitacional que han sido litificados), diques lamprofíricos (capas de roca básica que cortan otras formaciones geológicas) y brechas (fragmentos de roca cementados), así como otras kimberlitas diamantíferas inusuales que no resultan rentables desde el punto de vista económico.

Los diamantes han motivado una amplia variedad de investigaciones a raíz de su belleza, sus propiedades físicas excepcionales, su formación inusual y su valor. El estudio del origen de las formaciones que los alojan y la distribución global de las gemas ha ampliado nuestro conocimiento del dominio profundo terrestre y ha facilitado el desarrollo de métodos para sintetizar diamantes artificiales en el laboratorio.

RUBÍ Y ZAFIRO

El rubí y el zafiro son dos variedades preciosas del corindón, mineral que consiste en un óxido de aluminio cuya fórmula general es Al_2O_3. El rubí y el zafiro son probablemente las gemas de color más comercializadas; representan aproximadamente un tercio de las ventas, en términos de valor. Pueden llegar a alcanzar los mayores precios pagados por una gema: en 2006 un rubí birmano de 8,62 quilates se vendió por 3.640.000 dólares; en 2009, un zafiro de Cachemira fue adquirido por 2.396.000.

El corindón cristaliza en el sistema hexagonal: presenta tres ejes cristalográficos situados en un plano horizontal que forman ángulos de 60º entre sí y un cuarto eje vertical perpendicular a los anteriores. El rubí es rojo; el zafiro, de color azul. Las variedades con otras



Cristales naturales de rubí en bruto, de unos dos centímetros de largo, procedentes de Winza, Tanzania.



En 2002, un cazador inuit descubrió zafiros en la isla canadiense de Baffin (*izquierda*). Una microfotografía realizada en nícoles cruzados muestra una lámina delgada pulida (de 30 micras de grosor) de una roca que contiene zafiro proveniente de dicho afloramiento (*centro*). El mineral dorado del centro de la imagen es piroxeno; lo rodea una mezcla de mica verde y feldespato gris, que a su vez está circundado por escapolita violeta y nefelina gris. El zafiro acostumbra hallarse en la nefelina (aunque en esta imagen no se observa la presencia de zafiro). En la prospección de zafiro en la isla de Baffin se utilizan técnicas de luz ultravioleta para excitar la fluorescencia de la escapolita (*derecha*), un mineral que suele asociarse con esta gema. Sin embargo, la escasa oscuridad durante el verano permite utilizar este método únicamente durante dos o cuatro horas por la noche.

coloraciones se denominan zafiros, pero se matizan con un calificativo («zafiro amarillo», etcétera). Tanto el rubí como el zafiro pueden presentar asterismo, un fenómeno que consiste en la aparición de «estrellas» en la superficie de las piedras talladas en cabujón, es decir, de forma redondeada y sin facetas. Las «estrellas» en cuestión se deben a la luz reflejada por inclusiones aciculares de rutilo, un mineral compuesto por óxido de titanio, o a fases de hierro o hierro-titanio dispuestas en alineaciones que forman ángulos de 60º entre sí y están contenidas en planos cristalográficos paralelos a las caras hexagonales.

El color del rubí se atribuye al cromo que sustituye al aluminio en la estructura cristalina. El cromo es también el responsable del color verde de la esmeralda, aunque se desconoce la causa de la diferencia de color entre esmeraldas y rubíes. En ambas gemas, el átomo de cromo se encuentra rodeado de seis átomos de oxígeno, pero en cada cristal absorbe la luz de distinta manera. De acuerdo con una de las teorías que explican la diferencia de color, la coloración responde al potencial electrostático que el resto de los iones de la red cristalina impone en los electrones activos de la unidad cromo-oxígeno.

En el caso del rubí, se cree que el principal causante es el campo eléctrico generado en las proximidades del ion cromo. Un campo que no existe, cuando se trata de la esmeralda, dada la simetría de su red cristalina. Como consecuencia de la carga eléctrica, la capacidad de absorción del rubí se transfiere a energías más altas. Y así, la gema presenta, por un lado, dos grandes bandas de absorción de luz visible, a longitudes de onda de unos 400 y 550 nanómetros, y, por otro, dos ventanas de transmisión situadas a 480 nanómetros (azul) y 610 (rojo). En la visión humana, el rubí es rojo porque nuestro ojo es más sensible a este color, por encima de los 610 nanómetros, que al azul. Muchos de los rubíes procedentes de Birmania y Vietnam presentan un efecto de color rojo fuego, que responde a la combinación entre el propio color rojo del rubí y su fluorescencia roja bajo radiación ultravioleta u ocasionalmente bajo luz diurna.

El color azul del zafiro se atribuye a la transferencia electrónica entre menos del 0,01 por ciento de los iones de hierro (Fe^{2+}) y titanio (Ti^{4+}), que sustituyen a los iones de aluminio (Al^{3+}) en la estructura cristalina. Para que tenga lugar dicha transferencia de cargas, se requieren cantidades específicas de energía procedentes de la luz en una longitud de onda determinada. Dicha longitud es absorbida y, por tanto, no es visible. En el caso del zafiro, la transferencia de cargas entre los átomos de hierro y titanio consume la luz del extremo rojo del espectro; por eso, la gema ofrece un color azul. Con frecuencia, la variedad incolora «gueda» del zafiro se calienta para obtener una mayor transparencia y tonalidad azul mediante la fusión de inclusiones y la subsecuente liberación de hierro y titanio.

La variedad rosa-anaranjada del corindón se denomina padparadscha, término sánscrito que remite al color de la flor de loto. Parte del aluminio de su estructura cristalina es sustituido tanto por iones de cromo (Cr^{3+}), que le confieren una tonalidad rosa, como por iones de hierro (Fe^{3+}), que le dotan de una tonalidad amarilla debido a la transferencia de carga con iones de oxígeno (O^{2-}). La mayor parte del corindón gema se extrae en yacimientos de tipo placer, que se clasifican en aluviales (por transporte de agua), coluviales (por transporte gravitacional) y eluviales (por meteorización). También puede encontrarse en paleoplaceres.

La distribución global de los yacimientos de corindón guarda relación con contextos geodinámicos de colisión, rift y subducción. Se han reconocido tres períodos principales de formación de corindón: la orogenia panafricana (desde hace 750 hasta 450 millones de años), que dio lugar a yacimientos de gemas primarias en África, India, Madagascar y Sri Lanka; la formación del Himalaya (desde hace 45 hasta 5 millones de años), que originó los yacimientos asiáticos de rubí, contenido en mármoles; y, por último, las extrusiones cenozoicas de basalto alcalino (desde hace 65 hasta 1 millón de años). Las regiones productoras tradicionales son Cachemira, Birmania, Sri Lanka y Tailandia. Entre los incorporados más recientes destacan Australia, Madagascar y Vietnam.

Los rubíes y zafiros de mayor calidad proceden de potentes niveles marmóreos compuestos de calcita ($CaCO_3$). Pero, ¿cómo se introdujo en el mármol el aluminio que requiere la formación de corindón? ¿Y el cromo, titanio y hierro, necesarios para su coloración? ¿Por qué no entra en juego la sílice, que es tres



Las piedras preciosas suelen ubicarse en áreas remotas y aisladas. Esta imagen, tomada en los Territorios del Noroeste de Canadá, muestra un afloramiento de color blanco donde se halla un yacimiento de esmeraldas. Las rocas en primer término son granitos, la formación de tono oxidado es caliza Rabbitkettle y la unidad negra corresponde a pizarras del grupo Earn.

veces más común en la corteza terrestre? Si la sílice estuviera presente formaría enlaces con el aluminio e inhibiría la generación de corindón. Estamos estudiando un yacimiento en la zona central de Columbia Británica para responder a tales cuestiones. Los primeros resultados nos revelan que el material precursor que originó el mármol corresponde a finas capas de caliza de tipo lodo (*mudstone*). Durante el proceso metamórfico que dio lugar al mármol, ciertos minerales contenidos en la caliza (esencialmente mica, que es un silicato, así como muchos otros minerales traza) sufrieron una serie de reacciones que culminaron en la formación de corindón.

ESMERALDA

La esmeralda constituye la variedad preciosa del berilo, un mineral que contiene berilio y cuya fórmula general es $Be_3Al_2Si_6O_{18}$. Al igual que el corindón, el berilo cristaliza en el sistema hexagonal. El color de la esmeralda se debe a concentraciones traza de cromo y vanadio, o bien a la sustitución de aluminio por parte de ambos elementos. El cristal de berilo consiste en un apilamiento de anillos de silicio y oxígeno en cuyo canal central pueden quedar atrapadas moléculas de agua y otras impurezas.

La esmeralda es una de las gemas más cotizadas. El mayor precio que se ha pagado por una esmeralda alcanzó los 1.149.850 dólares y correspondió a una pieza colombiana de 10,11 quilates en 2000. La estipulación del precio de las esmeraldas es única en el mercado de las gemas de color, ya que su coloración constituye un valor prioritario ante la claridad, brillo u otras características. Se supone que corresponde a Colombia el 60 por ciento de la producción mundial de esmeraldas. La producción oficial en 2001 fue de 5,5 millones de quilates, valorados en más de 500 millones de dólares. Le sigue Zambia en términos de valor.

El berilo puede contener cantidades significativas de agua en los canales de su estructura cristalina. Al calentarse por encima de los 400 ºC, el agua confinada se rompe y libera moléculas de gas que quedan atrapadas en los huecos de los canales. El agua se libera a temperaturas superiores a 800 ºC, sin que ello influya en la proporción natural entre los isótopos de hidrógeno. El agua confinada en los canales puede representar la composición del fluido original en el momento de la cristalización y, por otra parte, la medida de la variación de la composición isotópica del hidrógeno en el agua liberada por el berilo puede determinar la procedencia de los fluidos que alimentaron el crecimiento del cristal.

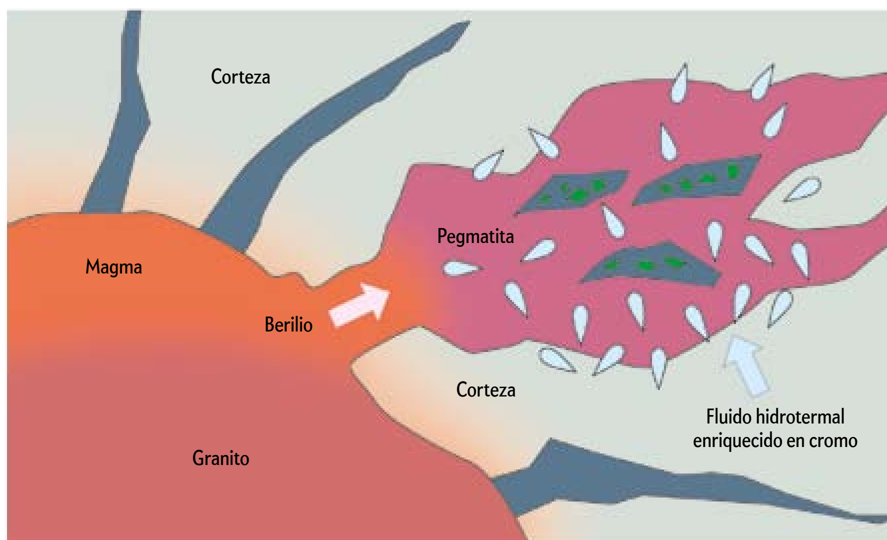
La composición isotópica de artilugios históricos elaborados con esmeraldas se ha empleado para demostrar que, en tiempos remotos, los artesanos trabajaron con esmeraldas formadas en yacimientos que no se descubrieron, tal parecía, hasta el siglo XX. Las investigaciones realizadas por Gaston Giuliani y su equipo, del Centro Francés de Investigación Petrográfica y Geoquímica, han demostrado que la mayoría de las esmeraldas de alta calidad talladas en el siglo XVIII en India se transportaron desde Colombia; estudios anteriores habían supuesto un origen más cercano.

Lo mismo el berilo que el crisoberilo (descrito en la siguiente sección) son relativamente poco comunes debido a la escasez de berilio en la parte superior de la corteza continental. El berilio tiende a concentrarse en granitos, pegmatitas (rocas formadas a partir de magmas muy hidratados) y pizarras negras (rocas sedimentarias), así como en las rocas que derivan de su metamorfismo. El cromo y el vanadio, más comunes en la corteza continental superior, se concentran en rocas ígneas —peridotitas, dunitas (un tipo de peridotita) y basaltos (magma enfriado rápidamente)— de la corteza oceánica y del manto superior; también, en sus equivalentes metamórficos. Pero podemos, además, hallar altas concentraciones de cromo y vanadio en rocas sedimentarias, en particular pizarras negras.

Se requieren, pues, condiciones geoquímicas y geológicas poco usuales para que el berilio (contenido en rocas forma-



Una esmeralda hallada por el autor y su equipo en Ontario.



Las pegmatitas constituyen una de las principales fuentes de esmeraldas, aunque no las únicas. El magma asciende y se enfría; en la última porción de roca fundida se concentran agua y minerales (berilio, por ejemplo). El magma enriquecido penetra en fracturas causadas por el calentamiento de la roca encajante; luego, las expande para formar pegmatitas. Las condiciones óptimas para formar esmeralda se reúnen en las áreas donde los fluidos hidrotermales con alto contenido en cromo (*gotas azules*) se infiltran a través de la roca y se mezclan con el magma pegmatítico. A medida que se enfría, la pegmatita crea cavidades donde la esmeralda puede cristalizar.

das en el interior de los continentes) coincida con el cromo y el vanadio (concentrados en rocas volcánicas asociadas a dorsales oceánicas). Según el modelo clásico, las pegmatitas que contienen berilio, en estado magmático, interaccionan con rocas máficas o ultramáficas (ricas en hierro y magnesio) con alto contenido en cromo. Ello no empece que otro tipo de eventos geológicos de carácter tectónico puedan tal vez participar en la formación de determinados yacimientos de esmeraldas.

Un caso que no se ajusta al modelo clásico es el de los yacimientos colombianos. No existen datos de actividad magmática. Los más de 200 yacimientos y hallazgos de esmeraldas de Colombia se localizan a lo largo de dos franjas estrechas que flanquean la cordillera Oriental. Las esmeraldas colombianas se formaron como resultado de un crecimiento hidrotermal asociado a la actividad tectónica. Varios estudios señalan que los fluidos hidrotermales tienen un origen evaporítico. Se estima que dichos fluidos resultaron de la interacción del agua con niveles salinos intercalados en pizarras negras emplazadas en profundidades de al menos 7 kilómetros, donde la temperatura alcanzaba al menos 250 ºC. Los fluidos hipersalinos, de elevada alcalinidad, atravesaron en su ascenso unidades sedimentarias emplazadas a lo largo de planos de falla de despegue (planos de deslizamiento entre dos masas rocosas cuyo estilo de deformación es distinto a ambos lados de la falla) y posteriormente interaccionaron con las pizarras negras.

Se da por cierto que la materia orgánica, así como el azufre procedente de la misma, cumple una función esencial en la formación de los yacimientos de esmeraldas en Colombia, aunque la naturaleza exacta de la reacción correspondiente siga envuelta en el misterio. A un origen similar se recurrió para explicar una mineralización inusual de esmeraldas en las pizarras de Red Pine, formadas durante el Neoproterozoico (desde hace 1000 millones a 542 millones de años) en la región suroccidental de las montañas Uinta, en el estado de Utah. Los fluidos hipersalinos, con alto contenido en sulfato, ascendieron desde la cuenca de Uinta a lo largo de la zona de falla de South Flank e interaccionaron con las pizarras, ricas en carbono. En presencia de carbono orgánico, el sulfato se redujo y dio lugar a sulfuros y esmeraldas.

Sin embargo, existe un profundo desacuerdo sobre la función de los procesos tectónicos en la formación de ciertos yacimientos de esmeraldas. Por ejemplo, se ha sugerido que el origen de las esmeraldas de Habachtal, en Austria, guarda relación con procesos de metamorfismo regional. La hipótesis se basa en las huellas de metamorfismo y cizalla, y de etapas de crecimiento múltiple como los porfiroblastos de tipo *augen* (en forma de ojo) en la roca encajante y las alineaciones curvas de inclusiones que presentan algunas esmeraldas. Las críticas a esta interpretación sostienen que el modelo clásico de las pegmatitas mantiene su validez también en este caso. A pesar de que los orígenes pegmatíticos del berilio no son evidentes, los fluidos podrían haberse alejado considerablemente de las pegmatitas, en particular si circularon a través de rocas intensamente cizalladas. Y, cierto, en la región existen pegmatitas.

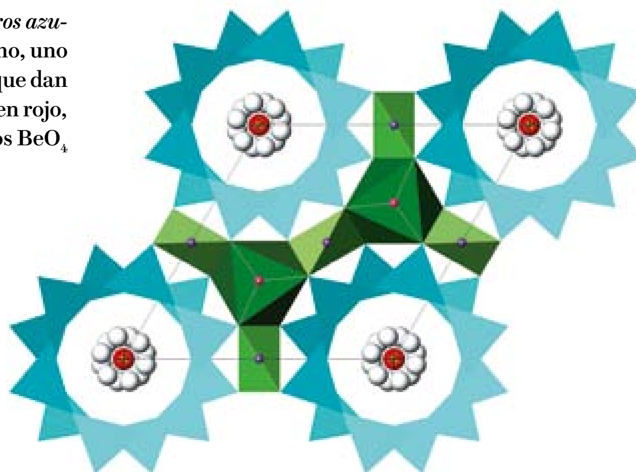
En fecha reciente, se ha analizado la composición isotópica



Existen tres tipos de berilo: morganita, aguamarina y heliodoro. Los tres presentan la misma base mineral, pero exhiben diferentes colores en función de las impurezas contenidas en su estructura cristalina. El color del aguamarina (*centro*) y el del heliodoro (*derecha*) se atribuyen a iones de hierro, aunque en cada caso presentan un estado de oxidación distinto. El color de la morganita (*izquierda*) se debe a iones de manganeso. Los mismos iones darían lugar a berilo rojo, si se encontraran en un estado de oxidación diferente.

AMERICAN SCIENTIST (ilustración); WIKIMEDIA COMMONS/CHRIS RALPH/DOMINIO PÚBLICO *(berilio)*

La estructura cristalina del berilo contiene grupos SiO_4 (*tetraedros azules*) en los que el átomo de silicio se rodea de cuatro átomos de oxígeno, uno en cada vértice del tetraedro. Los grupos se unen formando anillos que dan lugar a canales en cuyo centro se alojan moléculas de agua (oxígeno en rojo, hidrógeno en blanco). Los tetraedros deformados simbolizan grupos BeO_4 y los octaedros verde oscuro corresponden a grupos AlO_6.



del boro en turmalinas coexistentes con esmeraldas para deducir el origen del yacimiento de Habachtal. Los datos isotópicos indican la existencia previa de dos fases fluidas separadas que se mezclaron parcialmente en una zona de cizalla durante la cristalización de las turmalinas y las esmeraldas, aunque ninguno de los dos fluidos tenía un origen pegmatítico. Una de las dos fases fluidas guardaba relación con procesos de metamorfismo regional y transportaba boro isotópicamente ligero, tal y como se observa en la roca encajante. El otro fluido procedía de serpentinitas (rocas máficas oxidadas por acción del agua) y transportaba isótopos de boro más pesados, típicos de dorsales basálticas oceánicas o de una corteza oceánica alterada.

Se aplicó ese mismo método en las esmeraldas del yacimiento de Tsa da Glisza, en Yukón, Canadá. Las esmeraldas se localizan principalmente a lo largo del contacto entre filones de cuarzo-turmalina y las rocas máficas encajantes. En este caso, los datos isotópicos registrados se correlacionaban con un origen del boro eminentemente granítico y una aportación de isótopos pesados del boro procedentes de formaciones ultramáficas.

OTROS TIPOS DE BERILO

La familia del berilo cuenta, además, con otros miembros que se consideraron también piedras preciosas. Mencionemos el aguamarina y el berilo maxise (azules), berilo dorado (amarillo), heliodoro (amarillo verdoso), goshenita (incoloro), morganita (rosa) y el berilo rojo. A excepción de este último, el resto suele presentarse en pegmatitas y rocas metamórficas.

Las investigaciones de nuestro grupo indican que el color del berilo azul se debe a la transferencia de carga entre iones de hierro con diferentes estados de oxidación. Los iones de hierro Fe^{2+} situados en la posición del aluminio intercambian electrones con pequeñas cantidades de Fe^{3+} (unos 0,04 átomos por fórmula unidad en ejemplares azul oscuro). El aguamarina se explota en minas de Brasil, Colombia, Kenia, Madagascar, Malawi, Rusia, Tanzania y Zambia, así como en placeres en Sri Lanka.

El berilo maxise es una variedad gema procedente de Brasil. Su color azul obscuro se relaciona con la presencia de inclusiones de nitrato (NO_3^-) y carbonato (CO_3^-) en el centro de las estructuras anulares del cristal. El color pierde intensidad tras una exposición prolongada a la luz, debido a la desintegración de átomos de hidrógeno en la estructura cristalina. Un estudio reciente ha revelado que el nitrato procede de un proceso natural, mientras que el carbonato responde a la radiación emitida por la roca encajante.

El color del berilo dorado y el heliodoro se atribuye a los cationes de hierro (Fe^{3+}); el rosa de la morganita (bautizada en honor al financiero J. P. Morgan), a los iones de manganeso (Mn^{2+}). La morganita se halla en Afganistán, Madagascar y en Pala, California. El valor de la goshenita como gema es bastante bajo. Con el fin de incrementarlo, puede colorearse mediante radiación con partículas de alta energía o por electrolisis (ruptura de un material por acción de una corriente eléctrica). Ambos métodos engendran distintas coloraciones en función de las impurezas que contenga el ejemplar. En épocas pasadas, la goshenita se utilizó en la manufacturación de gafas y lentes, aprovechando su transparencia.

El color del berilo rojo se relaciona con los iones de manganeso (Mn^{3+}). Esta variedad se ha encontrado solo en riolitas (rocas volcánicas ricas en silicio y pobres en hierro y magnesio) que contienen topacio, en México, Nuevo México y Utah. El berilio necesario para formar el berilo rojo parece proceder de la riolita encajante. La movilización del berilio, en forma de complejos de flúor-berilio, se vio favorecida por el bajo contenido en calcio de las riolitas, que inhibió la formación de fluorita (CaF_2). La movilización se produjo cuando los gases ricos en flúor asociados con el enfriamiento de las riolitas entraron en contacto con vapores procedentes de agua subterránea calentada. La mezcla dio lugar a un fluido supercrítico, es decir, una fase fluida cuya temperatura y presión superan un determinado umbral de modo que puede infiltrarse en los sólidos como si fuera un gas, pero presenta la capacidad de disolver materiales, como si fuera un líquido. La ausencia de inclusiones de minerales arcillosos en el berilo rojo indica que el mineral se formó a temperaturas inferiores a las requeridas para la cristalización de un magma riolítico (inferiores a 650 ºC) pero superiores a las de la alteración arcillosa (200 a 300 ºC).

El único yacimiento en el que se explota comercialmente berilo rojo de calidad gema es la mina Ruby Violet (también llamada Red Beryl) en las montañas Wah Wah, del condado de Beaver, Utah. La producción total durante los 25 años anteriores a 2003 superó los 60.000 quilates, de los cuales el 10 por ciento fueron facetables. El precio de los ejemplares facetados puede alcanzar los 10.000 dólares por quilate.

En 2006, Arūnas Kleišmantas y sus colaboradores, de la Universidad de Vilnius en Lituania, estudiaron materiales extraídos en Poona, Australia, y Kifubu, Zambia. Propusieron una nueva variedad preciosa del berilo, la «cromaguamarina»; presenta una composición similar a la de la esmeralda, aunque su concentración de hierro (de 0,48 a 1,11 %) es considerablemente mayor que la de cromo (de 0,08 a 0,15 %) o vanadio (menos del 0,02 %).

CRISOBERILO

Otra de las gemas que contienen berilio y se distinguen del berilo es el crisoberilo, de fórmula general $BeAl_2O_4$. Presenta colores desde amarillo dorado hasta amarillo verdoso o parduzco. Su color responde a la sustitución de aluminio por ca-



La alejandrita, un tipo de crisoberilo, presenta un efecto óptico que le confiere color verde bajo luz natural (con alto contenido en longitudes de onda azules) y color rojo bajo luz incandescente (con alto contenido en longitudes de onda rojas). Tal efecto se debe a pequeñas cantidades de cromo en su estructura cristalina.

tiones de hierro (Fe^{3+}) en la estructura cristalina. En los últimos años, gran parte del crisoberilo gema se ha explotado en depósitos aluviales de los estados brasileños de Bahía, Espírito Santo y Minas Gerais.

Las dos variedades de crisoberilo más cotizadas son la alejandrita y la cimofana. El color de la alejandrita varía desde azules verdosos bajo luz natural hasta rojo profundo bajo luz incandescente. El efecto se debe a la sustitución del aluminio por pequeñas cantidades de cromo en la estructura cristalina. La cimofana, una variedad translúcida del crisoberilo también denominada «ojo de gato», presenta inclusiones aciculares de rutilo que le confieren un efecto óptico particular: una banda brillante de luz que se desplaza por la piedra al rotarla. El efecto es más visible en gemas talladas en cabujón. El ojo de gato representa una pequeña proporción de la producción total de crisoberilo.

El origen de los yacimientos de crisoberilo ha sido muy discutido. La mayoría se relaciona de algún modo con cuerpos pegmatíticos, pero en muchos casos la gema se asocia con minerales ricos en aluminio, ausentes en las pegmatitas. Algunas investigaciones han concluido que, en condiciones de alta temperatura y presión, la asociación mineral de berilo y aluminosilicatos es inestable y se descompone para dar lugar a una asociación de berilo y cuarzo.

En 1968-1969, se descubrió crisoberilo asociado a esmeralda y fenaquita (otro mineral de aluminio y berilio) en A Franqueira, noroeste español. Con frecuencia, el crisoberilo presenta maclas cíclicas, es decir, asociaciones de cristales no paralelos que comparten ciertos puntos de sus redes cristalinas. En numerosos casos muestra las mismas variaciones de color que la alejandrita bajo diferentes fuentes de luz. Los minerales de berilio se encuentran en zonas ricas en flogopita (un mineral fosfato) y dunita (una roca ultramáfica) en las que ha tenido lugar una intrusión pegmatítica asociada a un plutón granítico con abundante contenido en potasio y óxido de aluminio.

Todo indica que el crisoberilo podría haber cristalizado en finas capas sobre cristales preexistentes de olivino (silicato rico en hierro y magnesio), pues las estructuras cristalinas de ambos minerales guardan ciertas semejanzas. Otros análisis establecieron que el crisoberilo se había formado como resultado de la alteración metamórfica del mineral zafirina, un silicato de magnesio y aluminio con alto contenido en berilio que recibe este nombre por su color parecido al zafiro.

Los datos texturales y composicionales revelan que el crisoberilo se formó bajo procesos de metamorfismo regional en facies granulita (cuerpos de roca metamórfica de grano medio a grueso que fueron sometidos a intensos cambios de presión y temperatura), proceso que bien pudo, de la roca sedimentaria encajante, liberar berilio.

TANZANITA Y TSAVORITA

La tanzanita es la variedad gema, de color azul oscuro, del mineral zoisita, de fórmula $Ca_2Al_3(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$. El color azul se atribuye al vanadio, que sustituye al aluminio en la estructura cristalina. La gama de colores de gran parte de la tanzanita en bruto incluye el marrón grisáceo, violeta grisáceo, violeta marrón, así como marrón azulado y verdoso. Para alterar las impurezas y eliminar los tonos indeseables, los ejemplares deben someterse a calentamiento.





La tanzanita, tanto en bruto como facetada, es azul (*izquierda*); de color verde, la tsavorita (*derecha*).

La tanzanita se descubrió en 1967, en las proximidades de Merelani, noreste de Tanzania, que continúa siendo su lugar exclusivo de extracción. Los yacimientos se hallan en el flanco occidental de una serie de rocas plegadas y metamorfizadas conocidas como el cinturón orogénico de Lelatema. Los cristales de tanzanita suelen localizarse o bien en las charnelas de los pliegues, en cavidades de filones de cuarzo que han experimentado estiramiento por procesos geológicos posteriores a su formación, o bien en mármoles, silicatos de calcio o gneises (rocas metamórficas con una laminación característica) alterados por acción hidrotermal.

La composición y textura manifiestan que, inicialmente, el cromo y el vanadio fueron lixiviados de pizarras negras sometidas a un metamorfismo progradante (en el que se liberan especies volátiles al aumentar presión y temperatura), para reconcentrarse luego en una fase de metamorfismo hidrotermal retrogradante (cuando la roca se enfría y puede incorporar volátiles) y formar así tanzanita y otros minerales. Se estima que los fluidos que dieron lugar a la tanzanita circularon por las charnelas de los pliegues a temperaturas comprendidas entre 390 y 450 ºC y bajo una presión de unos 3 kilobares. Las dataciones por el método de las trazas de fisión indican que la edad de cristalización de la tanzanita alcanza 585 millones de años; dicha técnica analiza los daños causados en un material por la desintegración radiactiva del mismo.

La famosa minorista de joyería Tiffany & Co. acuñó el nombre de la gema en 1969. El mercado mundial de tanzanita en bruto se estima en unos 100 millones de dólares al año. Los ejemplares de extraordinaria finura de menos de 50 quilates pueden llegar a valorarse en 1000 dólares por quilate.

Tiffany & Co. también acuñó el nombre tsavorita, que proviene del Parque Nacional Tsavo, en Kenia. La tsavorita es una variedad gema verdosa de un granate de calcio y aluminio conocido como grosularia (de *Ribes grossularia*, arbusto de color similar), cuya fórmula general es $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$. El color verde de la tsavorita se debe a la sustitución de aluminio por vanadio en la estructura cristalina. Las gemas facetadas de tsavorita de tres quilates o más son muy raras.

El granate gema de color verde que posteriormente fue conocido como tsavorita se descubrió en 1967, en el noreste de Tanzania. La mayoría de las minas y yacimientos mundiales más importantes de tsavorita se encuentran en el este de Tanzania y en el sudeste de Kenia, cerca de la frontera entre ambos países. Todos los yacimientos se albergan en gneises grafíticos enriquecidos en vanadio, asociados con mármoles en formaciones metasedimentarias (rocas sedimentarias con huellas de metamorfismo).

Las regiones mineras tanzanas de Merelani, Lemshuku y Namalulu se ubican en el flanco occidental del cinturón orogénico de Lelatema. Los mejores cristales de tsavorita se hallan en la región de Merelani, en gneises grafíticos alterados por acción hidrotermal, junto a cristales de tanzanita y turmalina enriquecida en cromo. Como en el caso de la tanzanita, las gemas se concentran en filones de cuarzo, charnelas de pliegues y estructuras de estiramiento.

En las minas de Komolo y Lemshuku, en la región minera de Lemshuku, la tsavorita aparece en filones de cuarzo y grietas que atraviesan gneises grafíticos ricos en vanadio, así como en estructuras nodulares de forma irregular. Los cristales contenidos en los nódulos suelen presentar fracturas. Bajo los yacimientos principales hay un depósito formado por erosión y acumulación mecánica de cristales.



La mayoría de los ejemplares de topacio natural son incoloros, si bien abundan los dotados de tonalidades rosas o marrones.

Algunos estudios indican que la tsavorita se forma a presiones que superan los 5 kilobares y a temperaturas superiores a los 750 ºC. Sin embargo, se ha demostrado que la tanzanita de Merelani cristalizó a temperaturas y presiones inferiores; presumiblemente, su formación, tardía, no obedeció a procesos de metamorfismo regional, sino a fluidos hidrotermales.

TOPACIO

La fórmula general del topacio es $Al_2SiO_4(F,OH)_2$. Suele ser incoloro, pero en ocasiones puede ser amarillo pálido, rosa, naranja, marrón, azul, verde o gris. Las tonalidades rosas y rojizas se relacionan con el cromo y el magnesio y con la sustitución de aluminio por hierro. Los colores marrones y azules se deben esencialmente a centros de color, un tipo de defectos que se localizan en el interior de los ejemplares y pueden ser realzados mediante un tratamiento térmico. El topacio irradiado de color azul cielo comenzó a aparecer en el mercado a mediados de los ochenta del siglo pasado; el color se atribuye al grupo hidroxilo (OH^-), que sustituye a aniones de oxígeno en la posición del flúor antes de la irradiación.

Se conocen más de 80 yacimientos de topacio bien cristalizado en todo el planeta. La mayor parte del topacio gema se relaciona con pegmatitas, en particular las de Minas Gerais en Brasil, que suelen ser superficiales y presentan altos contenidos en elementos de tierras raras.

El topacio se presenta también como mineral primario en flujos riolíticos. En el oeste de EE.UU. y México se extiende un cinturón riolítico cenozoico rico en flúor que muestra un alto contenido en topacio. El topacio cristaliza en cavidades miarolíticas; más raramente, en fracturas o en el interior de la propia riolita. Los análisis texturales sugieren que la formación de



Un fragmento de jade maya grabado: **El ejemplar corresponde a la roca jadeitita. El jade puede presentar también composiciones nefríticas.**

topacio tuvo lugar desde los primeros estadios de la extrusión hasta etapas posteriores del proceso extrusivo y que las temperaturas oscilaron entre 650 y 850 ºC, aunque la mayor parte cristalizó en el rango inferior del intervalo en cuestión. Sin embargo, se ha demostrado que el topacio incoloro de Cerro El Gato, en el área de San Luis de Potosí, México, cristalizó por encima de los 500 ºC a partir de fluidos enriquecidos en elementos lixiviados procedentes de la lava; el topacio de color ámbar cristalizó, en cambio, por debajo de los 500 ºC a partir de fluidos ricos en elementos volátiles, el arsénico entre ellos.

El topacio gema no suele cristalizar ni en greisenes ni en filones, aunque el yacimiento de Ouro Preto en Minas Gerais, Brasil, podría suponer una excepción. En esta región se explota un gran volumen de topacio, la variedad «imperial» sobre todo, de color rojo y enriquecida en cromo. Se han propuesto diversas hipótesis para explicar el origen de estos yacimientos, desde pegmatitas hasta filones hidrotermales. Esta última posibilidad se basa en las altas concentraciones de hidroxilo en el interior del topacio.

DOS TIPOS DE JADE

El término «jade» hace referencia tanto a la roca jadeitita, compuesta casi exclusivamente por jadeíta ($NaAlSi_2O_6$), como a la nefrita, una variedad criptocristalina del mineral tremolita-actinolita [$Ca_2(Mg,Fe)_5Si_8O_{22}(OH)_2$] cuyos cristales son tan pequeños que apenas se perciben bajo el microscopio. La jadeitita es más dura que la nefrita, pero la resistencia a la fractura y la energía superficial de la nefrita es aproximadamente el doble que la de la jadeitita. Esta piedra preciosa es menos común y está más cotizada que la nefrita; se emplea más en joyería que en escultura.

La jadeíta pura es blanca. Las tonalidades verdes y azules se deben a la sustitución de aluminio por hierro en su estructura cristalina. El color verde esmeralda de la variedad «imperial» se debe a una escasa sustitución del 2 al 3 por ciento de aluminio por cromo. El color malva se atribuye al manganeso cuando el contenido en hierro es muy bajo. La nefrita, por otra parte, muestra raramente un color verde esmeralda intenso, resultado de la sustitución por cromo.

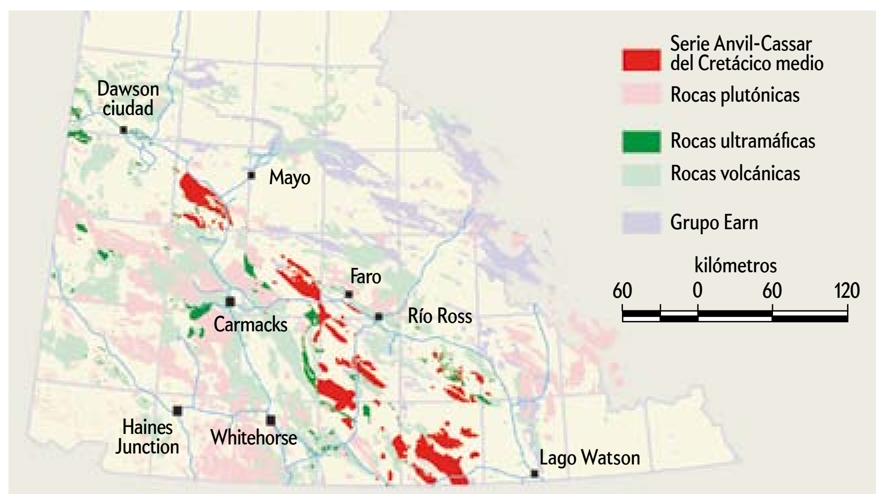
Se han documentado unos 14 yacimientos de jadeitita. La región de jadeitita de mayor importancia corresponde al Jade Tract, en el estado de Kachin, norte de Birmania. Allí, la jadeitita se presenta en forma de intrusiones o fragmentos en conglomerados ricos en serpentina, así como en depósitos aluviales. Otro gran centro productivo de jadeitita lo hallamos en la zona central del valle de Motagua, en Guatemala, donde a cada lado del límite entre la placa Norteamericana y la placa de Cocos se extiende un cinturón rocoso asociado con serpentinita. Los datos indican que todos los yacimientos de jadeíta (y gran parte de los de nefrita) se originan en zonas de límite de placa: los fluidos interaccionan con peridotitas serpentinizadas y las rocas circundantes desde los 50 kilómetros de profundidad hasta la superficie.

La mayor parte de la nefrita se origina por metasomatismo de contacto o de infiltración de dos modos distintos: el reemplazamiento de serpentinita y el reemplazamiento de dolomita. El primero tiene que ver con la presencia de calcio en zonas de contacto con rocas más ácidas; el segundo se debe a la acción de fluidos silícicos asociados a magmas graníticos. Los yacimientos del primer tipo son mayores y más abundantes que los segundos. Las asociaciones minerales halladas en los yacimientos de nefrita relacionada con serpentinita indican que experimentaron metamorfismo y metasomatismo a temperaturas de entre 300 y 350 ºC a entre 200 y 100 ºC. Los yacimientos principales de este tipo de sustitución de serpentina se hallan en minas del norte de Columbia Británica y en los montes siberianos de los Sayanes orientales. Las explotaciones relacionadas con el reemplazamiento de dolomita se encuentran en los montes Kunlan, China, y en la provincia de Cowell, en el sur de Australia.

BENEFICIO DE ALTA TECNOLOGÍA

Muchas piedras preciosas se siguen extrayendo en lugares remotos y por particulares. Pero la industria gemológica actual cuenta con métodos modernos y sistemáticos para descubrir nuevos yacimientos. En el decenio de los ochenta, las imágenes del satélite de observación terrestre Landsat se hicieron públicas y se permitió su adquisición a bajo precio. Desde entonces, las prospectoras de alta tecnología las han utilizado junto a las imágenes espectroscópicas de áreas sin vegetación para cartografiar directamente yacimientos minerales. Los satélites más recientes han mejorado la resolución de las imágenes.

En Canadá, las imágenes por satélite y la fotografía aérea se han utilizado para localizar potenciales afloramientos de kimberlitas diamantíferas, ya que la lectura química y magnética de estas formaciones volcánicas difiere de las rocas circundantes. La búsqueda de anomalías magnéticas facilita particularmente el descubrimiento de kimberlitas cubiertas por otros materiales o sumergidas bajo masas de agua. En 2002, se identificó en Canadá un área de 1,2 millones de kilómetros cuadrados que podría albergar kimberlitas. Tras la realización de un muestreo directo, la región se circunscribió a 32.000 kilómetros cuadrados. En la actualidad, las empresas prospectoras han iden-



En este mapa del territorio Yukón de Canadá se muestran las regiones que presentan una alta concentración de berilio (contenido en la serie rocosa Anvil-Cassar y en las rocas plutónicas del Cretácico medio) y las áreas ricas en cromo y vanadio (contenidos en rocas ultramáficas, rocas volcánicas y las rocas del grupo Earn). Presumiblemente, las zonas donde se combinan los tres tipos de yacimientos son propicias para la prospección de esmeraldas.

tificado 22 kimberlitas con un contenido en diamantes que se presume elevado.

En prospección minera pueden utilizarse, además, otras propiedades físicas y químicas de las rocas. Cédric Simonet y sus colaboradores, de la empresa Akili Mineral Services, en Kenya, descubrieron que las rocas asociadas con yacimientos de rubíes presentaban una resistencia eléctrica y radiactividad más baja en comparación con las rocas encajantes.

Otra posibilidad es la prospección geoquímica, basada en la identificación de composiciones minerales distintivas, relacionadas con ciertos yacimientos de piedras preciosas. En Colombia, se descubrió que las rocas encajantes enriquecidas en sodio, aunque empobrecidas en litio, potasio, berilio y molibdeno, representaban buenos indicadores de yacimientos de esmeraldas. Se ha demostrado que las corrientes de agua y los sedimentos provenientes de yacimientos conocidos de esmeraldas constituyen buenos indicadores de la composición de la roca que alberga las gemas. Por tanto, el estudio de las corrientes de agua puede facilitar la localización de yacimientos de esmeraldas cercanos. Las anomalías en la concentración de sodio en los sedimentos se han empleado con fortuna para identificar nuevos hallazgos de esmeraldas.

Los berilómetros son dispositivos que facilitan la prospección de esmeralda y berilo. La máquina utiliza radiación gamma emitida por una fuente de antimonio para excitar átomos de berilio, lo que permite cartografiar su concentración en la roca encajante. Existen dos modelos de berilómetro: uno pesa poco más de 2 kilogramos, tarda unos minutos en leer los resultados y posee un límite de detección relativamente alto; el otro pesa unos 17 kilogramos y es mucho más rápido y sensible. Sus respectivas desventajas limitan la aplicación de estos instrumentos en trabajos de campo.

Las vastas extensiones de pizarra negra en el noroeste de Canadá podrían presentar yacimientos de esmeraldas similares a los de Colombia. Nuestro equipo de investigación ha acometido el estudio de dichos yacimientos, comenzando análisis geoquímicos que permitan la identificación de regiones con contenidos altos en sodio y bajos en berilio y potasio. Por otro lado, investigamos, con métodos de geología estructural, la situación de regiones que presenten fallas de desgarre y cabalgamientos asociados a planos de despegue.

Sobre el origen pegmatítico de las esmeraldas, sostienen algunos trabajos que las pegmatitas deben presentar cierto grado de fraccionamiento (separación de sus constituyentes de acuerdo con el criterio de solubilidad diferente) para que su contenido en berilio alcance la saturación. Las proporciones entre potasio/rubidio y rubidio/estroncio pueden utilizarse como indicadores geoquímicos para detectar las pegmatitas en cuestión. Además, las imágenes de satélite pueden permitir la identificación de plutones enterrados que hayan pasado inadvertidos.

Las nuevas técnicas de prospección gemológica deben utilizarse con precaución. Nuestro equipo de investigación ha demostrado que algunos de los métodos comerciales empleados para detectar berilio y cromo en las muestras podrían disolver las fases minerales que contienen dichos elementos, de modo que los resultados podrían ser inexactos. En el caso de utilizar la espectrometría de masas para determinar la concentración de un elemento tan ligero como el berilio, la sensibilidad de los análisis puede disminuir si se aplica un programa analítico que incluya un número elevado de elementos pesados.

La depuración de la técnica facilitará la localización de regiones susceptibles de albergar piedras preciosas. Pero, ¿podría este hecho disminuir su rareza y con ello su cotización? No resulta fácil predecir su influencia en el mercado. De lo que no cabe duda es de que una mayor cantidad de hallazgos hará que las gemas sean más apreciadas por los geólogos, quienes ponderan, por encima de cualquier otro aspecto, la información que los cristales aportan sobre la dinámica interna de la Tierra.

PARA SABER MÁS

The geology of gem deposits. Dirigido por L. A. Groat. Mineralogical Association of Canada, Short Course, vol. 37, 2007.

Emerald deposits and occurrences: A review. L. A. Groat, G. Giuliani, D. D. Marshall y D. J. Turner en *Ore Geology Reviews*, vol. 34, págs. 87-112, 2008.

Emerald mineralization associated with the Mavis Lake Pegmatite Group, near Dryden, Ontario. A. A. Brand et al. en *Canadian Mineralogist*, vol. 47, págs. 315-336, 2009.

Formation of diamond in the Earth's mantle. T. Stachel y J. W. Harris en *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 21, n.º 364.206, 2009.

Tourmaline geochemistry and $\delta^{11}B$ variations as a guide to fluidrock interaction in the Habachtal emerald deposit, Tauern Window, Austria. R. B. Trumbull et al. en *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 157, págs. 411-427, 2009.

Crystal chemistry of dark blue aquamarine from the True Blue showing, Yukon Territory, Canada. L. A. Groat et al. en *Canadian Mineralogist*, vol. 48, págs. 597-613, 2010.

Kimberlite ascent by assimilation-fuelled buoyancy. J. K. Russell et al. en *Nature*, vol. 481, págs. 352-356, 2012.

FARMACOLOGÍA

Terapia de la depresión

Los antidepresivos de las farmacopeas dejan mucho que desear. Tardan semanas en surtir efecto y fracasan en muchos pacientes. Los laboratorios investigan una medicación más eficaz

Robin Marantz Henig



TOM SCHIERLITZ, TRUNK ARCHIVE

Una mujer joven que firma en Internet con el seudónimo blueberryoctopus (*Hapaloclaena maculosa*, uno de los animales más letales) contaba sus problemas con los antidepresivos que tomó durante tres años, indicados, sobre todo, para remediar la ansiedad y los ataques de pánico. Lo hizo en la página web Experience Project. Tomaba Paxil, uno de los ISRS (inhibidor selectivo de la recaptación de serotonina) más conocidos, pero terminó por dejarlo porque anulaba su apetito sexual. Cambió a Xanax, un ansiolítico que le devolvió la libido, aunque a expensas de la reaparición de los síntomas. Después volvió al Paxil, para sustituirlo, luego, por Lexapro (otro ISRS), luego Pristiq, un antidepresivo que pertenece a una clase emparentada, los IRSN (inhibidores de la recaptación de serotonina y norepinefrina). Por la fecha en que redactó ese escrito, estaba tomando otro ISRS, Zoloft, más Wellbutrin (un primo de los IRSN que afecta a la actividad de la dopamina y la de la norepinefrina); buscaba con ello contrarrestar los efectos secundarios sexuales que le producía el Zoloft. «No noto demasiada diferencia con el Wellbutrin, pero ahora estoy con la dosis más baja —anotó—. Voy a volver al psiquiatra la próxima semana y quizá la subirá. Quién sabe.»

De ese modo podemos sintetizar la estrategia típica de ensayo y error en la prescripción de antidepresivos, no solo para la depresión per se sino también para trastornos relacionados, como el que sufre blueberryoctopus. La táctica, escribió Andrew Solomon en su libro *Noonday Demon*, un clásico sobre la depresión, «te hace sentir como un tablero de dardos». La aproximación terapéutica basada en el efecto tablero de dardos no se aplica instada exclusivamente por los efectos secundarios enojosos. Los ISRS y los IRSN que han dominado el mercado de los antidepresivos desde su inicio en los años ochenta y noventa no ayudan a todos y pueden fallar en más de un tercio de los pacientes. Un comprimido que hoy parece funcionar puede que deje de hacerlo mañana. Además, muchos fármacos necesitan varias semanas para que empiecen a mostrar un efecto apreciable, tiempo de espera que puede resultar especialmente peligroso. Según un informe publicado



en 2006 en el *American Journal of Psychiatry*, entre los pacientes de mayor edad (de 66 años en adelante), la administración de ISRS quintuplica el riesgo de suicidio durante el primer mes de tratamiento respecto a los meses subsiguientes.

Los pacientes necesitan antidepresivos que operen con mayor celeridad y eficacia. Pero el flujo de desarrollo de nuevos fármacos se está secando. De hecho, en los dos últimos años, Glaxo-SmithKline y otros gigantes de la industria farmacéutica han anunciado su intención de abandonar el diseño de nuevos fármacos en psiquiatría; una empresa demasiado cara, difícil y muy a largo plazo, aducen. Algunos científicos adscritos a laboratorios gubernamentales y universitarios, así como de compañías farmacéuticas de tamaño mediano, tratan de subsanar esas carencias. Que sus esfuerzos se vean coronados por el éxito, eso es harina de otro costal. Sea como fuere, el desarrollo de nuevos fármacos constituye un asunto de máxima urgencia para los pacientes con depresión. A muchos ni la psicoterapia ni los medicamentos les ayudan; se desesperan mientras aguardan que les llegue algo con qué aliviar su dolor psíquico, incluidos los tratamientos experimentales (instalación de electrodos o trepanación).

IMPORTA LA CELERIDAD

Los investigadores afanados en la búsqueda de antidepresivos de acción rápida han estudiado compuestos relámpago, que levantan el humor con rapidez, con la esperanza de averiguar por qué operan con mayor presteza que los ISRS, que aumentan los niveles del mensajero serotonina. Uno de esos compuestos es la ketamina; se trata de un anestésico, un analgésico y una droga de abuso que el vulgo denomina Special K. Entre otros efectos, repercute en el estado de consciencia y provoca alucinaciones. Los experimentos con roedores muestran que puede resultar tóxico para las células nerviosas; ello la descarta como posible sustancia antidepresiva. Pero ello no obsta para reconocer su extraordinario valor a la hora de depurar las ideas acerca de cómo lograr que los antidepresivos reduzcan los síntomas con mayor rapidez. Tal como ha demostrado el equipo de Ronald Duman y George Aghajanian, de la Universidad Yale, solo dos horas después de que se inyecte ketamina en ratas de laboratorio, los múridos empiezan a aumentar la síntesis de proteínas requeridas en la formación de nuevas sinapsis en la corteza prefrontal. (Las sinapsis son los puntos de contacto por donde fluyen las señales entre neuronas.) Se sabe que esa región del cerebro, situada justo detrás de los ojos, opera de un modo anómalo en los individuos depresivos. A las 24 horas de la inyección de ketamina, las ratas comienzan también a desarrollar nuevas espinas sinápticas a lo largo de las dendritas, que son las proyecciones de las células nerviosas que reciben señales de otras neuronas. A mayor número de espinas germinadas, mayor celeridad de la neurotransmisión. En los experimentos de Duman y Aghajanian, cuantas más espinas sinápticas brotan, menos conductas típicas de la depresión presenta el animal (como abandonar actividades en las que, en cualquier otra situación, se involucraría).

Robin Marantz Henig, colaboradora del *New York Times Magazine*, es periodista especializada en ciencia y salud.



«A lo largo del último decenio, se han ido cosechando numerosas pruebas que demuestran que, en la depresión, se produce atrofia, no crecimiento, en la corteza prefrontal y el hipocampo», resume Duman, que dirige el laboratorio de psiquiatría molecular de la Universidad Yale. «La ketamina revierte con rapidez esa atrofia» y restablece la normalidad. Se investiga ahora el ritmo exacto. En su grupo, examinan el cerebro de las ratas a las pocas horas de la inyección de ketamina para comprobar si se ha producido aumento de espinas sinápticas antes del transcurso de un día. La investigación complementaria sobre otro grupo de ratas deprimidas reveló que la ketamina inducía el crecimiento de espinas sinápticas. Para ello, Duman y su equipo se valieron de la activación de mTOR, una enzima neuronal. Y descubrieron esa conexión al administrar a los múridos un fármaco que bloquea la acción de la enzima. Suministraron ketamina a las ratas que tenían bloqueada mTOR. No pasó nada, lo que significaba que cuando se inhibía la molécula mTOR, la ketamina no ejercía ningún efecto en la proliferación de las espinas sinápticas ni en la reversión de la conducta depresiva. En otras palabras, la enzima mTOR necesitaba hallarse activa para que la ketamina indujera el desarrollo de espinas.

Dado que es demasiado arriesgado emplear ketamina como medicación rutinaria, los investigadores buscaron otros activadores de la mTOR. Sabían que la ketamina estimulaba la enzima al impedir que el glutamato (el principal neurotransmisor excitador del cerebro) actuara sobre el receptor NMDA (molécula de acoplamiento) en la superficie de las neuronas. Y ensayaron con otro bloqueador del NMDA, que desencadenaba también la activación de la mTOR, impulsaba con rapidez la formación de espinas y producía un efecto antidepresivo en ratas. En esa línea, Duman y su equipo se hallan ahora inmersos en el examen de nuevos compuestos que bloquean los receptores de NMDA; con una misma finalidad: averiguar si alguno de ellos podría resultar un antidepresivo de acción rápida.

Existe otro compuesto que eleva el humor con prontitud y que, como la ketamina, se expende ya en el mercado, aunque con otro fin. Se trata de la escopolamina, vendida como parches de piel para tratar el mareo. La escopolamina actúa sobre un circuito cerebral distinto del objeto de la ketamina; impide que el neurotransmisor acetilcolina, implicado en la atención y la memoria, se una a moléculas conocidas como receptores muscarínicos.

Por los años setenta, algunos investigadores repararon en que la manipulación de la acción cerebral de la acetilcolina podía provocar depresión. Cuando a pacientes bipolares, que os-

EN SÍNTESIS

Los antidepresivos actuales necesitan varias semanas para aliviar los síntomas. En algunas personas no alcanzan el fin deseado, y si lo alcanzan hoy pueden dejar de hacerlo mañana.

Se necesitan agentes de acción más rápida y basados en nuevos mecanismos. No obstante, el desarrollo de estos compuestos no se encuentra entre las prioridades de las grandes farmacéuticas.

Los laboratorios oficiales y universitarios, así como algunas compañías farmacéuticas de tamaño medio, tratan de llenar el vacío y tienen algunos planes interesantes.

cilan entre estados maníacos y depresivos, se les administraba, durante la fase maníaca, un fármaco que potenciaba la función señalizadora de la acetilcolina, desarrollaban al cabo de una hora síntomas depresivos, tales como tristeza y letargia. Además, cuando los pacientes depresivos tomaban un compuesto que aumentaba los niveles cerebrales de acetilcolina, la depresión se incrementaba. Podría inferirse de ello que los investigadores de antidepresivos inéditos abordaran formas de inactivar la acetilcolina. No obstante, el interés inicial quedó obstruido por el primer neurotransmisor de la lista en aquella época, la serotonina. De hecho, muchos psiquiatras pensaban que lo que hacía que los ISRS fueran tan útiles era, precisamente, que no actuaban sobre circuitos cerebrales que empleaban acetilcolina. E ignoraron la acetilcolina al pensar que los antidepresivos más antiguos, a diferencia de los ISRS, presentaban tantos efectos secundarios porque actuaban sobre el sistema colinérgico, en particular sobre los receptores muscarínicos, que forman parte de un subgrupo de receptores de acetilcolina distribuidos por todo el cerebro.

Por consiguiente, encontrar un fármaco que actuara específicamente sobre los receptores muscarínicos, sin efectos secundarios importantes, de acción rápida y eficaz, pugnaba contra los supuestos comúnmente aceptados. Pero tales son las propiedades que los científicos descubren en la escopolamina.

En un ensayo clínico en el que participaron 22 pacientes diagnosticados con depresión, el equipo de Maura Furey, de la división de terapias experimentales y fisiopatología del Instituto Nacional de Salud Mental (NIMH), observó que la inyección intravenosa de escopolamina aliviaba los síntomas en tres días. Los propios pacientes declararon que ya se sentían mejor a las veinticuatro horas de la inyección. Al final de las cuatro semanas de ensayo, casi dos tercios de los sujetos mostraron una mejoría significativa de los síntomas; en la mitad, remitieron. Estos efectos beneficiosos duraron cuatro semanas después de la dosis postrera. Esos mismos resultados se replicaron, más tarde, en otros 22 pacientes depresivos.

El NIMH espera encontrar una compañía farmacéutica que haga las pruebas y los ensayos clínicos necesarios para sacar la escopolamina al mercado como un antidepresivo de acción rápida. Furey se muestra «extremadamente decepcionada» de que todavía no haya habido interesados, considerando cuán bien funciona. Cierto es que la vía de administración representa un obstáculo. Administrar escopolamina intravenosa, según hacen algunos anestesiólogos como parte de una mezcla de anestésicos, resulta poco práctico. Como parche de piel, los niveles del fármaco en sangre no bastan; como fórmula de administración oral, la mayor parte de la escopolamina se elimina a través del sistema digestivo. Furey trabaja ahora en encontrar un modo de administración práctico y efectivo.

UNA SOLUCIÓN PARA EL RESTO

El otro gran inconveniente de la actual generación de antidepresivos, además del tiempo que tardan en empezar a surtir efecto, es que no funcionan para todo el mundo. Para resolver este problema, la investigación se centra en varios mecanismos de acción no explorados. Se están estudiando una segunda clase de receptores de la acetilcolina, los receptores nicotínicos, que responden también a la nicotina. En concreto, un equipo de Targacept, una pequeña compañía biofarmacéutica de Winston-Salem (Carolina del Norte), ha comenzado a trabajar en TC-5214, un fármaco experimental que bloquea un receptor nicotínico específico. Esperan comercializar el compuesto como tratamiento adicional en el caso de que no baste la administración de solo un antidepresivo para reducir los síntomas.

En ensayos iniciales en los que participaron 265 voluntarios, los pacientes que no respondieron al tratamiento solo con el ISRS citalopram (Celexa) tomaron TC-5214 o un placebo añadido al régimen terapéutico. En 2009 Targacept informó de que los sujetos que tomaron citalopram y placebo mejoraron en 7,75 puntos un parámetro estándar de evaluación (la escala de Hamilton para la depresión), mientras que los que tomaron citalopram y el fármaco experimental mejoraron en 13,75 puntos.

AstraZeneca acordó entonces con Targacept el desarrollo de más estudios extensivos de eficacia (ensayos en fase III), en los

---

LA HISTORIA EN NÚMEROS

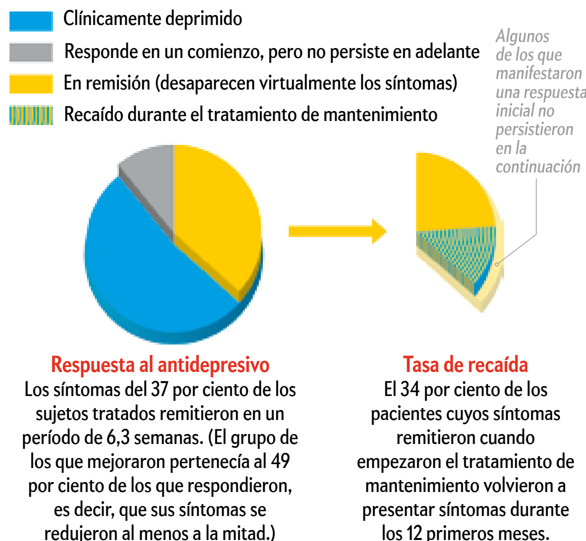
Un gran vacío

Los datos del ensayo Star*D subrayan la necesidad de mejores antidepresivos. Este ensayo monitorizó los efectos de la terapia farmacológica en unos 3000 pacientes. Los resultados, publicados en 2006, muestran que, si bien la medicación remedia a muchos, un segmento importante de los pacientes no responde del todo o recae incluso cuando los agentes funcionan durante cierto tiempo. Los fármacos pueden tardar semanas en alcanzar su punto máximo de eficacia.

Al principio del ensayo, los pacientes recibieron citalopram (Celexa), un inhibidor selectivo de la recaptación de serotonina que se prescribe actualmente de forma generalizada. A los que no mejoraron se les ofreció la posibilidad de varios tratamientos alternativos, pudiendo cambiar un máximo de tres veces. Los sujetos que respondieron a la terapia fueron seguidos durante un año mientras se encontraban en régimen terapéutico de mantenimiento.

Los datos que se presentan a continuación provienen de la primera fase del ensayo terapéutico con citalopram. En general, el 67 por ciento de los pacientes que pasaron por todas las fases del ensayo obtuvieron mejoría (al menos durante un tiempo), pero en cada fase sucesiva disminuía el porcentaje de pacientes que se restablecían y aumentaba la probabilidad de recaída.

El mejor caso: resultados de la primera fase del tratamiento de Star*D



Respuesta al antidepresivo
Los síntomas del 37 por ciento de los sujetos tratados remitieron en un período de 6,3 semanas. (El grupo de los que mejoraron pertenecía al 49 por ciento de los que respondieron, es decir, que sus síntomas se redujeron al menos a la mitad.)

Tasa de recaída
El 34 por ciento de los pacientes cuyos síntomas remitieron cuando empezaron el tratamiento de mantenimiento volvieron a presentar síntomas durante los 12 primeros meses.

FUENTE: «ACUTE AND LONGER-TERM OUTCOMES IN DEPRESSED OUTPATIENTS REQUIRING ONE OR SEVERAL TREATMENT STEPS: A STAR*D REPORT», POR A. JOHN RUSH ET AL., EN *AMERICAN JOURNAL OF PSYCHIATRY*, VOL. 163, N.º 11, NOVIEMBRE DE 2006; JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

que los sujetos recibieron un placebo o el TC-5214, además del antidepresivo original. Los dos primeros ensayos, en los que participaron 614 voluntarios, anunciaron resultados descorazonadores (comparadas con el grupo placebo, no hubo mejoría en las puntuaciones de depresión a las ocho semanas). Pero Targacept y AstraZeneca siguen adelante con otros dos ensayos de eficacia ya planificados, en los que participan más de 1300 voluntarios de centros de todo el mundo, y un estudio de seguridad a largo plazo.

Con un mecanismo de acción independiente de los efectos ejercidos sobre la serotonina o la norepinefrina, el antagonista de los receptores nicotínicos de Targacept ayuda a pacientes depresivos que no encuentran mejoría con los fármacos disponibles. Para subvenir a los pacientes que no responden importa dar un giro aún más radical. En vez de incidir en la señalización de uno u otro receptor, debe actuarse sobre un proceso biológico distinto. Nos referimos a la neurogénesis (desarrollo de nuevas neuronas), en particular del hipocampo, estructura situada en la base del cerebro; se la considera una de las dos regiones del cerebro adulto donde se produce la neurogénesis.

Hace tiempo que los cambios estructurales operados en el hipocampo se vincularon con la depresión. La autopsia cerebral de personas clínicamente deprimidas muestra a menudo atrofia y reducción significativa del volumen de la región. Los ISRS y los IRSN administrados alivian la depresión no solamente al modificar los niveles de serotonina, sino también al aumentar la génesis de nuevas células en el hipocampo. Pero este desarrollo procede con lentitud, por cuya razón probablemente tardan tanto en aparecer los efectos positivos del fármaco. Investigadores de Neuralstem, empresa farmacéutica radicada en Rockville (Maryland), confían en haber dado con un modo distinto de estimular la neurogénesis y mantenerla, incluso después de interrumpido el tratamiento.

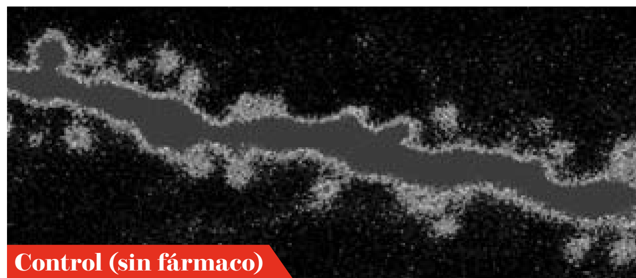
Hasta obtener la clave, los investigadores de Neuralstem usaron cultivos de células madre neuronales derivadas de células humanas de hipocampo, los únicos cultivos de este tipo en el mundo, según la compañía. Primero cribaron unos 10.000 compuestos para observar sus efectos en los cultivos de células de hipocampo. Según Karl Johe, jefe científico del proyecto, se trataba de identificar qué compuesto aumentaba la tasa de proliferación celular a los siete días. No llegaron a 200 los que superaron la prueba; de estos, el equipo de Neuralstem detectó una docena de compuestos candidatos que parecía que estimulaban la neurogénesis hipocampal. En 2004, empezaron los ensayos sobre animales, consistentes en inyectar las preparaciones a ratones normales sanos. Se administraron los compuestos más adecuados para instar el desarrollo de nuevas células hipocampales en ratones con conducta depresiva. A partir de ese protocolo surgió el compuesto más prometedor.

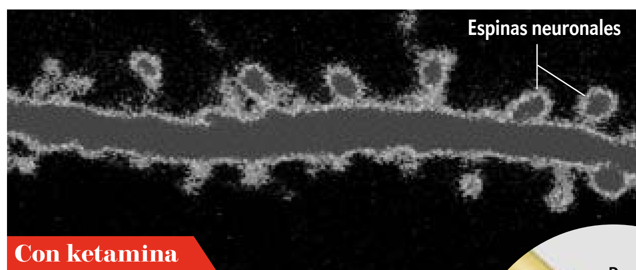
Neuralstem ha iniciado las primeras pruebas de seguridad (fase I) de NSI-189, en forma de comprimido, en humanos. En las pruebas de eficacia se recurrirá a la imagen por resonancia magnética para determinar si el fármaco aumenta la neurogénesis y se usarán otras medidas para establecer si alivia los síntomas de la depresión. Mas, incluso en el caso de que el NSI-189 funcione, no será de efectos rápidos. «No es como quien sufre epilepsia, a quien le das un fármaco para detener el acceso de inmediato —expone Johe—. Este tratamiento requiere cambios genéticos en la célula.» La atrofia del hipocampo tarda años en producirse; revertir el proceso también necesitará un largo período. Cabe esperar que los efectos sean de larga duración, de modo que el NSI-189 se necesite de forma intermitente. Pero se trata, en puridad, de una mera posibilidad.

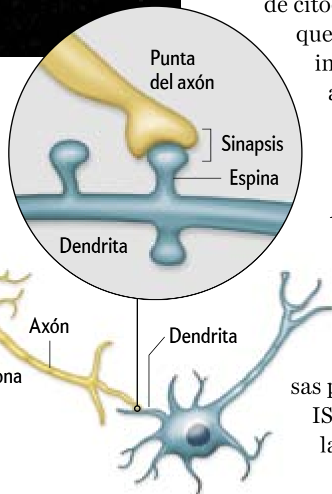
AHONDAR EN LAS RAÍCES

Sabemos ahora que la inflamación crónica, relacionada con el cáncer, la arteriosclerosis, la diabetes y otras enfermedades, contribuye a la depresión. Una observación que ha abierto una nueva perspectiva del problema. Se debe a varias líneas de investigación el poner de manifiesto el nexo entre depresión e inflamación, que es la respuesta característica del cuerpo ante un invasor. De acuerdo con ciertos estudios, las personas deprimidas presentan en la circulación concentraciones elevadas de citoquinas, unas proteínas de pequeño tamaño que orquestan los procesos inflamatorios. Citoquinas son la interleucina-6 y el FNT-alfa. Además, hará unos diez años que, cuando se administraban citoquinas inflamatorias en el tratamiento del cáncer de piel, los pacientes se deprimían. «Entrevisté a uno de estos pacientes de cáncer hace tiempo —comenta Andrew Miller, director de oncología psiquiátrica en el Instituto Winship de Cáncer de la Universidad Emory—, y me sorprendió que su depresión se pareciera tanto a la habitual en mi consulta psiquiátrica.»

Las citoquinas resultan particularmente perversas porque interfieren en la neurogénesis inducida por ISRS e IRSN. «Si eliminas la neurogénesis, pierdes la base sobre la que descansan los antidepresivos»,







En las dendritas de las neuronas brotan súbitamente nuevas espinas en ratas tratadas con ketamina (*arriba*). Las espinas son estructuras que reciben señales de otras neuronas (*diagrama*). La respuesta puede explicar por qué esa sustancia eleva el estado de ánimo en individuos deprimidos, horas después de ser administrada. La ketamina presenta demasiados riesgos para su administración rutinaria. Los científicos buscan sustancias más seguras y con idénticos efectos rápidos a propósito de las espinas.

CORTESÍA DE GEORGE AGHAJANIAN Y RONG-JIAN LIU, UNIVERSIDAD YALE; GEORGE RETSECK (*ilustración*)

declara Miller. Este efecto ayuda a explicar por qué las personas deprimidas con los niveles de inflamación más altos son también las más difíciles de tratar. En el año 2006, un grupo de investigadores publicó en *Lancet* que Etanercept, un fármaco que se estaba ensayando para tratar psoriasis en 618 sujetos, a menudo aliviaba la depresión, incluso en aquellos que no proporcionó mejoría para la psoriasis. Al parecer, ese efecto surge de la neutralización de la citoquina inflamatoria FNT-alfa. «En este punto, uno debería acudir enseguida a su médico y pedir ese medicamento para la depresión», dijo en aquel momento uno de los miembros del equipo, Ranga Krishnan, de la Universidad Duke, indicando que los resultados concernientes a la depresión fueron anecdóticos. Pero el aspecto científico se les ofrecía apasionante.



Miller encontró también apasionante la ciencia y se puso en contacto con Krishnan para pergeñar el ensayo de un antagonista de la citoquina en el tratamiento de la depresión: Remicade, un antiinflamatorio ya en uso que se administraba en la terapia de la artritis reumatoide y otras enfermedades autoinmunitarias. Se necesitaron más de cinco años, pero Miller y Charles Raison, compañero suyo en Emory, consiguieron financiación del NIMH para realizar el estudio. Han terminado el ensayo de Remitant en 60 pacientes depresivos resistentes al tratamiento. Han obtenido ya hallazgos prometedores.

Algunos investigadores han vuelto a fijar la mirada sobre la serotonina, si bien ahora buscan impulsar su actividad de un modo distinto: aumentando el número de receptores de serotonina disponibles para responder al neurotransmisor en las sinapsis. Con mayor radicalidad incluso, se han propuesto lograr dicho efecto mediante terapia génica, una expresión que no goza de particular favor entre los biólogos. Cierto es que se han anunciado ya unos primeros éxitos en terapia génica de la enfermedad de Parkinson. Uno de los estudiosos de esta patología se ha aplicado en conseguir otro tanto con la depresión.

El gen candidato para la terapia de la depresión es el *p11*, que cifra una proteína necesaria para el transporte de ciertos receptores de serotonina hasta la superficie celular. Sin *p11*, los receptores permanecen atrapados en el interior de la célula, privados de capacidad de respuesta a los mensajes de la serotonina. En el año 2006, Paul Greengard y su equipo, de la Universidad Rockefeller, demostraron que los roedores con conductas de índole depresiva (abandono de actividades que antes les producían placer, por ejemplo) tenían niveles bajos de *p11*. Autopsias de personas que habían sufrido depresión revelaban también niveles por debajo de lo normal.

Los «ratones *knockout*» desarrollados en el laboratorio de Greengard (ratones en los que el gen *p11* había sido eliminado) mostraron conductas parecidas a la depresión. El paso siguiente consistió en averiguar si, al administrar un gen *p11* funcional a los ratones que no lo tenían, se aliviarían los síntomas. A esa tarea se aplicó Michael Kaplitt, director del laboratorio de neurocirugía molecular de la facultad de medicina de Weil Cornell. Él y su equipo habían emprendido ya estudios similares de terapia génica para el párkinson. Usando el mismo adenovirus inactivado que le había servido para administrar un gen a los pacientes de párkinson, introdujeron el gen *p11* directamente en el nucleus accumbens de ratones carentes de dicho ADN. Su conducta depresiva remitió.

TOM SCHIERLITZ, TRUNK ARCHIVE

Cada neurocientífico tiene su área cerebral preferida. La de Kapplit es el nucleus accumbens, un centro cerebral importante para la recompensa y el placer, donde actúa la dopamina. Un síntoma frecuente de la depresión, la anhedonia (incapacidad para sentir placer de la vida), se cuenta entre los más devastadores y se halla, probablemente, relacionado con la señal de la dopamina. Le atrae también dicha estructura porque los estudios con RM funcional sobre animales y humanos muestran que está extensamente conectada con multitud de regiones del cerebro conocidas por su implicación en la depresión.

Aduce una tercera razón: el nucleus accumbens ha constituido ya diana quirúrgica en otro tratamiento experimental para la depresión, la estimulación cerebral profunda (ECP). Se implanta un electrodo en el nucleus accumbens de modo permanente y se inducen a través del mismo impulsos eléctricos periódicos [*véase* «Neuromodulación contra la depresión resistente», por C. V. Torres Díaz y otros; Mente y cerebro 55, 2012].

Según Kaplitt, la terapia génica que se realice directamente en el cerebro será más simple que la estimulación cerebral profunda, porque «en vez de un electrodo, introduciríamos este pequeño catéter y no dejaríamos ningún dispositivo dentro». (En la estimulación cerebral profunda no solo el electrodo está en el sitio de forma permanente, sino también el neuroestimulador, un dispositivo marcapasos, implantado cerca de la clavícula, que genera impulsos eléctricos.) En su trabajo sobre el párkinson, Kaplitt y su grupo corroboraron la seguridad del vector viral; mostraron también que podía suministrarse el gen correcto a través de un catéter a la región cerebral seleccionada, con la mejoría consiguiente de los síntomas. Bajo la dirección de Elisabeth A. Murray, del Laboratorio de Neuropsicología, y Pam Noble, del Centro de Cuidado de Primates, el NIMH ha puesto ahora en marcha estudios para probar la seguridad y eficacia de la terapia génica del gen *p11* en monos. Su éxito podría facilitar el inicio de ensayos clínicos en humanos.

Como para blueberryoctopus, no está a la vuelta de la esquina el advenimiento de mejores tratamientos. Tendría que haber mejores alternativas. Nadie debería verse obligado a escoger entre libido y desesperanza, nadie debería oír, después de probar y rechazar una serie de tratamientos para la depresión, que ya no queda nada por intentar. Si se cumple la promesa de la nueva generación de antidepresivos, quizá los obstáculos algún día serán menos dolorosos.

PARA SABER MÁS

Breaking ground, breaking through: The strategic plan for mood disorders research of the National Institute of Mental Health. 2001 report. Disponible en la página web de NIMH: **www.nimh.nih.gov/about/strategic-planning-reports/breaking-ground-breaking-through-the-strategic-plan-for-mood-disorders-Research.shtml**

The noonday demon: An atlas of depression. Andrew Solomon. Scribner, 2002.

Depression: Out of the shadows. Documental de PBS aparecido en 2008. En esta web puede verse el programa y encontrar más información: **www.pbs.org/wgbh/takeonestep/depression/index.html**

Stress, depression, and neuroplasticity: A convergence of mechanisms. Christopher Pittinger y Ronald S. Duman en *Neuropsychopharmacology Reviews*, vol. 33, págs. 88-109; 2008.

Stuck in a rut: Rethinking depression and its treatment. Paul E. Holtzheimer y Helen S. Mayberg en *Trends in Neuroscience*, vol. 34, n.º 1, págs. 1-9; noviembre 2010.

El NIMH tiene una interesante aplicación interactiva en su página web sobre la prevalencia de la depresión y varias enfermedades psiquiátricas, con sus alternativas de tratamiento: **www.nimh.nih.gov/statistics/index.shtml**

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Creación de una metaloteca

El estudio sistemático de la materia constituye una de las puertas de entrada a la ciencia y la tecnología

Los veintidós metales y aleaciones de la tabla, en el mismo orden.

Apreciado lector, levante por unos instantes los ojos de las páginas que está leyendo y observe su entorno. A poco que se fije descubrirá multitud de artefactos metálicos a su alrededor. Compruebe que los metales no se utilizan solo a modo de elemento estructural; forman parte indispensable en todo tipo de objetos. Verbigracia, se esconden en las bisagras de los muebles, en los contactos de los interruptores eléctricos, en las soldaduras de los circuitos integrados de su teléfono móvil y en los clips de papel. De todo ello no resulta difícil concluir que nuestra civilización ha construido un mundo metálico, al menos en parte —algo bien distinto del mundo natural, donde los metales son prácticamente invisibles.

Curiosamente, las interesantísimas propiedades de los metales son desconocidas para muchos. Y lo que es peor, para la mayoría de los estudiantes, y sin que ello produzca ninguna alarma. La mayor parte de mis alumnos confundían la plata con el aluminio, el hierro con el titanio o el zinc con el estaño. Hemos llegado así a una situación paradójica: mientras se consideran faltas graves la confusión de algunas letras o el olvido de una «h» en cualquier palabra, no despierta preocupación alguna que nuestros pupilos sean incapaces de distinguir el oro del latón. El asunto no es baladí, de la misma forma en que resulta esencial escribir con corrección, es también importante conocer el idioma de la materia, el alfabeto tangible con el que hemos construido nuestro universo tecnológico, paso previo a numerosas vocaciones científicas.

Miremos de nuevo a nuestro alrededor. Además de metales y aleaciones, podemos descubrir otras muchas materias. Pero, curiosamente, el abanico de lo común no es extenso: bastan poco más de cien especies materiales (naturales, artificiales y

sintéticas) para construir la mayor parte de todo lo visible. Si bien es cierto que nuestra civilización y su potentísima industria química han sintetizado millones de compuestos que han venido a sumarse a los que tomamos directamente de la naturaleza, en nuestro entorno cotidiano hallamos un número relativamente reducido de materiales. Según un criterio puramente práctico, podemos clasificarlos en cinco grupos: metales y aleaciones, maderas y derivados, plásticos y elastómeros, fibras y tejidos, y, finalmente, rocas y cerámicas.

En esta ocasión nos centraremos en la creación de una colección sistemática de metales, una biblioteca donde a cada libro le corresponde un metal común. Para ello deberemos localizar ejemplares adecuados, que nos permitan descubrir las interesantísimas propiedades de este gran apartado del mundo tecnológico.

Para tal propósito, el instrumental es mínimo: unas bolsas de plástico con cierre hermético donde anotaremos la procedencia y otros datos relevantes, un imán, una pila y una bombilla, una vela, papel abrasivo y —atención— la agudeza sensorial del lector, porque solo con una adecuada percepción sensitiva podremos distinguir de visu la mayor parte de especies metálicas.

Para empezar, lancémonos a una expedición de búsqueda. Sin salir de nuestro hogar, taller o laboratorio, podremos localizar muchos de los materiales de la tabla de clasificación que acompaña este artículo. Los metales y aleaciones que integran esta selección cumplen alguno de estos criterios: ser o haber sido materiales de uso frecuente, ser relevantes en el dominio científico, técnico o artístico, o revestir interés pedagógico. (Por supuesto, el lector resuelto a descubrir los metales puede aderezar su metaloteca con muchas más muestras, escogidas según sus intereses.)

Entrando en materia, diremos que conocer los materiales equivale a conocer sus propiedades, sus características físicas. Esto es lo que permite comprender el porqué de sus aplicaciones o realizar una descripción precisa de los mismos. Lo cual no es poca cosa. El lego en la materia suele hacer un retrato del metal como algo de color «plateado», que pesa y está frío. No es suficiente. Debemos desarrollar lenguaje. Si queremos explicar cómo es el aluminio, diremos que muestra un lustre metálico, color blanco y alta reflectancia; que es ligero, buen conductor térmico, que no se oxida de forma evidente, que es blando ya que se ralla con facilidad y que no muestra reacción alguna ante un imán. Obsérvese que el desarrollo de un léxico exige la categorización de propiedades, la percepción de matices y la comprobación de comportamientos, algo que se encuentra —permítanme la reiteración— a años luz de las posibilidades de muchos de nuestros alumnos.

Volvamos a nuestra tabla de clasificación. Ante una muestra metálica desconocida, seguiremos los siguientes pasos. Para empezar, asegurémonos que el material en cuestión es realmente un metal. Eliminemos cualquier pátina u oxidación superficial con un poco de papel de lija, hasta dejar la superficie bien limpia y tersa. ¿Presenta lustre o brillo metálico? ¿Es más denso que un plástico, madera o roca? Y todavía, por si nuestros sentidos nos engañan, podemos hacer una pequeña prueba: cerremos con la muestra un circuito eléctrico compuesto por una pila de 1,5 voltios y una bombilla. ¿Conduce la electricidad? En caso afirmativo, es casi seguro que nos hallamos en el buen camino, ya que las otras sustancias conductoras son claramente distintas (*véase el recuadro*).

Dentro del panorama metálico, destaca un ejemplar casi único, el mercurio, uno de los pocos metales líquidos alrededor de temperatura ambiente que puede localizarse fácilmente. En la actualidad podemos encontrar, dentro de este exclusivo grupo, aleaciones rarísimas hace pocos años, como el galistan, un compuesto intermetálico a base de galio, indio y estaño, que se usa como substituto del tóxico mercurio en los termómetros clínicos. Descartados estos metales líquidos de fácil clasificación, seguiremos avanzando con la ayuda del imán. ¿Presenta la muestra alguna atracción magnética? Una respuesta afirmativa nos conduce al universo del hierro y los aceros, con la excepción de algunos inoxidables. No podemos descartar la posibilidad de que nuestro misterioso metal corresponda a níquel o cobalto, o incluso gadolinio, cada vez más accesible, de interesantísimas propiedades magnéticas; pero lo más probable es que nos hallemos ante un trozo de aleación en base hierro, no en vano su consumo mundial supera el de todos los otros metales juntos.

Distinguir entre miles de aleaciones, fruto del extraordinario esfuerzo de generaciones de metalúrgicos, resulta im-

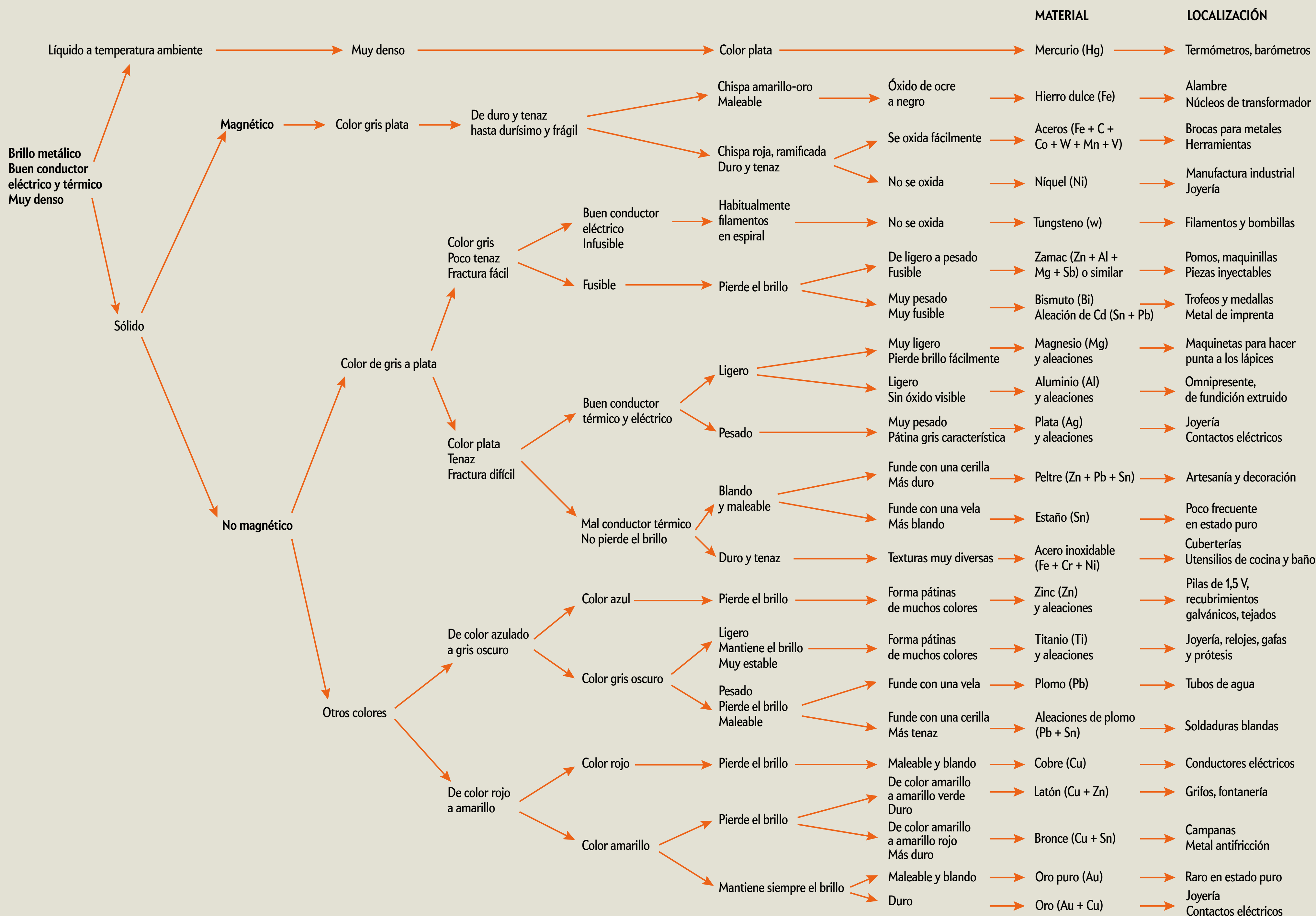
¿QUÉ ES UN METAL?

Los metales conforman el grupo de elementos químicos mayoritario en la tabla periódica. De rarísimos a comunes, ocupan la parte central de la misma; sus características pasan progresivamente de muy reactivos a muy nobles. Entre los paradigmáticos destacan el oro, la plata y el cobre, que exhiben un comportamiento metálico perfectamente marcado. La conductividad eléctrica de estos materiales es siempre elevada; resulta de un tipo de enlace entre los átomos llamado precisamente metálico, en el cual los electrones de los distintos átomos circulan libremente por el retículo cristalino. A este tipo de enlace y a la estructura cristalina se debe que los metales sean —a diferencia de los no metales y semiconductores— dúctiles y maleables, y que su conductividad térmica sea notable (si bien algunos como el bismuto son pésimos conductores del calor). Asimismo, su conductividad eléctrica disminuye cuando aumenta la temperatura.

Aparte de esas características genéricas, los metales son diversos. Sus puntos de transición de estado varían en un rango amplísimo: desde el mercurio, líquido a temperatura ambiente, pasando por el galio, que funde en la palma de la mano, llegamos al tungsteno, que se licua por encima de los 3000 ºC. También la densidad presenta una gran variación: desde valores inferiores a la del agua a más de veinte kilos por litro.

El comportamiento ante un campo magnético es disímil. Hallamos algunos ejemplos extremos en los materiales ferromagnéticos, que son atraídos por un imán; los diamagnéticos, en cambio, resultan repelidos. Lo mismo podríamos decir de la dureza o la ductilidad. Los metales muestran además una interesante tendencia a formar aleaciones que abarcan un amplio espectro de posibilidades. Pueden formar compuestos de fórmula bien definida, soluciones sólidas, compuestos intermetálicos y mezclas en diverso grado. Por todo ello, pueden seleccionarse aleaciones con características óptimas para cada uso. Y mediante tratamientos térmicos como el temple o el recocido es posible gobernar su microestructura para adaptarlos a los requerimientos de mecanización y uso.

CLASIFICACIÓN DE LOS METALES Y ALEACIONES MÁS COMUNES



posible. Como mucho, podemos deducir a qué gran grupo pertenece. Aspecto y color nos ofrecen la primera pista: el hierro puro presenta tintes azules, parecidos de lejos al zinc; ligeramente aleado se oxida con facilidad, mostrando pátinas desde el ocre al negro, y es flexible y tenaz. Cuando al hierro se añaden otros metales se obtienen aleaciones durísimas y a la vez frágiles, como los aceros para herramientas, brocas, etcétera. Un criterio para distinguirlas son las chispas que se desprenden al atacar la muestra con una muela de abrasivo. La chispa amarilla y poco o nada ramificada es síntoma de baja aleación; cuando es brillante, roja y se ramifica en otras formando cascadas, denota un acero duro y tenaz. Hasta aquí podríamos habernos confundido con el único metal también común del grupo del hierro: el níquel; pero dado que este no se oxida perceptiblemente, reacciona con menor intensidad ante un imán y es más blando que los aceros, la confusión es poco probable.

Descartadas las aleaciones magnéticas, nos adentramos en un ámbito donde el color es de nuevo la primera propiedad de cribado. Todos reconocemos fácilmente el cobre y el oro. Pero distinguir aleaciones como el bronce o el latón requiere mayor atención. No es difícil. Con paciencia, podremos captar el color azulado del zinc, el gris oscuro del titanio o el blanco clarísimo del aluminio; además, aprenderemos a interpretar las capas oxidadas que se forman en la superficie, las tonalidades verdosas de los compuestos de cobre, las amarillentas del estaño o las blanquecinas y pulverulentas del plomo o el magnesio. A partir de aquí, podemos retomar las pruebas más físicas: la dureza la averiguaremos sometiendo la muestra al rallado con minerales de dureza conocida; la fragilidad, o maleabilidad, la indagaremos mediante la ayuda del martillo y sobre el yunque. En el caso de las aleaciones de plomo y estaño, su fusibilidad a la vela acabará por clarificar ante qué metal nos encontramos.

Fijémonos ahora en la densidad. Vale la pena contrastar la muy distinta sensación que produce un trozo de plomo, un metal muy denso, con uno de aluminio, muy ligero. No menos interesante resulta la comparación de hierro con titanio: con densidades respectivas de 7,5 y 4,5 gramos por centímetro cúbico, son perfectamente distinguibles. Tampoco pasan inadvertidas otras señales más sutiles, como los olores característicos del hierro, el estaño y otros metales. El aluminio y el magnesio producen una sensación eléctrica al entrar en contacto con nuestra lengua. (Obsérvese que la clasificación avanza con la percepción de propiedades y características, que, cruzadas con el estudio del propio objeto, nos explican muchas cosas del mundo tecnológico y científico.)

Al proceso anterior lo llamamos la lectura de la pieza, es decir, el estudio ordenado de la muestra con el propósito de establecer, tal y como lo haría un detective, su constitución, origen y procesos o vicisitudes técnicos por los que ha pasado. El resultado final es bien claro: la ampliación de nuestro bagaje de conocimientos para valorar en su justa medida algo de tan importantes implicaciones científicas, económicas o ecológicas como los metales. Conocimientos imprescindibles para fomentar las vocaciones científicas que tanto necesitamos.

por Agustín Rayo



Agustín Rayo es profesor de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es especialista en filosofía de las matemáticas y filosofía del lenguaje.

Lenguajes naturales e inteligencia artificial

¿Qué nos enseña la informática acerca del significado de nuestras palabras?

Su amiga Fabiola le ha invitado a la fiesta de inauguración de su nueva casa. Las instrucciones para llegar son las siguientes: «Camina por la avenida Corrientes hasta llegar a la plaza de Santa Catalina. Allí, frente a la iglesia, verás dos casas. Yo vivo en la azul. ¡Te esperamos!».

Considere ahora las dos situaciones siguientes. En la primera, una de las casas de la plaza es gris; la otra, azul grisáceo. En la segunda, los respectivos colores de las viviendas son azul grisáceo y azul oscuro. ¿Cómo debería usted interpretar las instrucciones de Fabiola en cada caso?

La respuesta parece clara. En la primera situación, usted concluirá que Fabiola vive en la casa de color azul grisáceo; en la segunda, que Fabiola habita en la casa de color azul oscuro. Vemos, pues, que la interpretación de la palabra «azul» depende del contexto. ¿Cómo podemos modelizar esta dependencia contextual?

El modelo estándar

De acuerdo con lo que llamaré modelo estándar, cada una de las palabras del lenguaje posee un significado básico que no depende del contexto. En ciertos casos, sin embargo, dicho significado básico puede quedar modulado, o matizado, por uno o varios parámetros cuyos valores dependerán del contexto.

Consideremos un ejemplo sencillo: la palabra «yo». De acuerdo con el modelo estándar, «yo» poseería un significado básico que no depende del contexto. Para fijar ideas, supongamos que dicho significado viene dado por algo así como «el hablante en el contexto *c*», donde *c* denota un parámetro cuyo valor depende del contexto. Si usted dice «yo no tengo frío», *c* quedaría determinado por el contexto de su aseveración. En cambio, si soy yo quien pronuncia la misma frase, *c* tomará un valor distinto. Como resultado, el «yo»

de su discurso se refiere a usted, mientras que el «yo» de mi frase refiere a mí.

De igual modo, la palabra «azul» también poseería un significado básico independiente del contexto, pero sujeto a parámetros contextuales. Supongamos que dicho significado se corresponde con «aquel color cuya matriz se encuentra entre m_1 y m_2, con una saturación comprendida entre s_1 y s_2, y una luminosidad entre l_1 y l_2». De nuevo, el valor concreto de tales parámetros quedará determinado por la situación en la que nos encontremos.

Podemos ilustrar esa dependencia contextual con el ejemplo de Fabiola. En él, la palabra «azul» se aplica a dos tonalidades con saturaciones diferentes: cuando los objetos relevantes son de color gris y azul grisáceo, los parámetros de saturación s_1 y s_2 se fijan de tal manera que el término «azul» alude solo al azul grisáceo; en cambio, cuando las viviendas son de color azul grisáceo y azul oscuro, s_1 y s_2 toman valores tales que el término «azul» solo se aplica al azul oscuro.

A pesar de su aparente plausibilidad, el modelo estándar se enfrenta a una serie de problemas. Uno de ellos reside en que, para poder adaptarse a la inmensa variabilidad contextual que caracteriza al uso de la lengua, el proceso que fija los valores de los parámetros contextuales del significado básico de una palabra como «azul» debería resultar extraordinariamente complejo. Sin embargo, no resulta nada obvio que los humanos seamos capaces de operar de manera eficiente con funciones tan enrevesadas.

Por otro lado, el modelo estándar halla dificultades a la hora de hacer frente a las expresiones vagas. Imagine que un amigo le dice: «Ve a la habitación de al lado y tráeme las bolas azules». Usted entra en la sala y encuentra allí una larguísima fila de bolas. La primera de ellas es claramente azul; pero, a medida que examina las siguientes, se percata de que las bolas van adquiriendo tonos cada vez más verdosos hasta llegar a la última, de color verde esmeralda.

En una situación así usted jamás podría satisfacer la demanda de su amigo, ya que carecería de la información necesaria para decidir dónde poner la línea divisoria entre las bolas que pueden considerarse azules y las que no: para cada bola que decidiese elegir como la última, sus vecinas inmediatas se antojarían candidatas igualmente buenas. Sin embargo, de acuerdo con la versión más simple del modelo estándar, el significado de la palabra «azul» (relativo a un contexto dado) debería determinar una separación precisa entre las tonalidades a las que puede aplicarse dicho calificativo y el resto.

Un modelo alternativo

Algunos de los defensores del modelo estándar han intentado enfrentarse a tales problemas mediante refinamientos y complicaciones de la idea básica. En mi opinión, sin embargo, ninguna de esas propuestas resulta verdaderamente satisfactoria, motivo por el que tal vez deberíamos abandonar el modelo estándar.

Pero ¿cómo formular un modelo alternativo? De acuerdo con la propuesta que considero más prometedora, las propiedades semánticas de una palabra serían bastante limitadas. En lugar de adscribir al término «azul» una regla semántica («color cuya matriz se encuentra entre m_1 y m_2, con una saturación comprendida entre s_1 y s_2, y una luminosidad entre l_1 y l_2»), la única información semántica que un hablante asociaría a dicho término se correspon-

¿Cuál de las dos casas es «azul»? **La interpretación semántica de las palabras depende del contexto. Modelizar dicha dependencia no resulta tarea sencilla.**



dería con una «muestra» de color azul: una representación mental de alguna tonalidad de azul específica.

De acuerdo con el modelo alternativo, una muestra de color azul no basta por sí sola para determinar la aplicación de la palabra «azul», ya que no existe ninguna regla que especifique cuán parecido a la muestra debería resultar un objeto concreto para ser considerado azul. En su lugar, las personas aprovecharíamos la información contextual para decidir cómo interpretar el término «azul» en cada caso.

Podemos ilustrar la idea principal con el ejemplo de Fabiola. Consideremos primero la situación en la que las dos viviendas son de color gris y azul grisáceo. Y supongamos que la muestra a la que usted asocia la palabra «azul» coincide con un tono de azul muy particular: el celeste. Ninguna de las dos casas presenta un color especialmente cercano al de su muestra; sin embargo, la vivienda de color azul grisáceo se asemeja mucho más a su muestra que la casa gris. Por tanto —y dado que usted sabe que Fabiola está tratando de ayudarle—, ello le proporcionará la información necesaria para inferir que Fabiola ha empleado la palabra «azul» para referirse a la casa de color azul grisáceo.

Consideremos ahora la situación en la que las casas son de color azul oscuro y azul grisáceo. Ahora, ambas guardan cierto parecido con su muestra. Tal vez la casa azul oscuro se asemeje más a ella, o tal vez no. Sin embargo, usted sabe que el vocabulario de Fabiola incluye también la palabra «gris», por lo que si su amiga se hubiese propuesto identificar la casa de color azul grisáceo, habría podido hacerlo de manera clara y sencilla recurriendo a esa palabra. El hecho de que Fabiola haya empleado el término «azul», y no «gris», le permite inferir que Fabiola se refería a la casa de color azul oscuro.

Dado que el modelo alternativo adscribe propiedades semánticas muy limitadas a la palabra «azul», ahora el hablante puede añadir el término a su léxico sin necesidad de invertir en ello demasiados recursos cognitivos. En lugar de memorizar una regla semántica como la que postula el modelo estándar, bastará con que recuerde algún tono particular de azul y lo emplee como muestra. Según el modelo alternativo, nuestra competencia lingüística dependería mucho más de nuestra capacidad para aprovechar la información contextual que de las propiedades semánticas de las palabras.

Por último, otra ventaja del modelo alternativo reside en su facilidad para hacer frente al fenómeno de la vaguedad. Dado que ahora la palabra «azul» no se encuentra asociada con ninguna regla semántica, tampoco existe una divisoria entre las tonalidades a las que se les puede aplicar dicha palabra y las restantes. Para emplear el término con éxito, basta con que un hablante sea capaz de aprovechar la información contextual a la hora de dividir una serie de objetos entre los que pueden considerarse azules y los que no. Cuando nos encontramos ante la larga fila de bolas con colores comprendidos entre el azul y el verde, el modelo alternativo predice, correctamente, que la petición de su amigo («tráeme las bolas azules») no tendrá éxito. Ello se debe a que dicha oración ha sido formulada en un contexto que no proporciona información suficiente para saber a qué bolas deberíamos asociar el término «azul».

Inteligencia artificial

Todos sabemos que los ordenadores pueden ejecutar tareas asombrosas, desde maniobrar un cohete para que aterrice en Marte hasta vencer al campeón del mundo de ajedrez. Sin embargo, resulta extraordinariamente difícil programar una computadora para que actúe con sentido común. Hace poco, un amigo me relataba los denodados esfuerzos de un grupo de expertos en inteligencia artificial para diseñar un robot que circulase por una habitación sin chocar contra los muebles. Cuando los técnicos lo programaron para que acatase dicha orden, el ingenio reaccionó quedándose parado. Cuando le añadieron la directriz de ponerse en movimiento, el robot se limitó a girar sobre su eje.

Durante los últimos años, los investigadores en ciencias de la computación han venido realizando esfuerzos considerables para lograr que los ordenadores empleen mejor la información contextual y, de esta manera, aumente su «sentido común».

El Laboratorio de Medios, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, es algo así como una juguetería para científicos: un espacio interdisciplinario dedicado a encontrar maneras novedosas —y no ortodoxas— de aplicar los últimos avances tecnológicos a la vida cotidiana. La investigación de Dustin Smith, uno de los estudiantes de doctorado del laboratorio, se centra en el desarrollo de técnicas que permitan a un usuario interaccionar con su ordenador por medio del lenguaje natural.

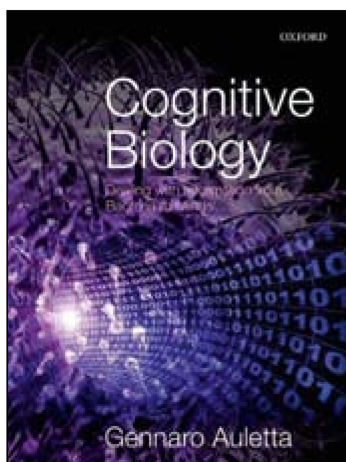
Lograr dicho objetivo implica que el ordenador debería aprender a aprovechar la información contextual. Imagine que usted le pide a su computadora que realice una reserva «en algún restaurante cercano que no sea demasiado caro». Para satisfacer esa demanda, el ordenador deberá emplear la información del contexto para determinar, entre otras cosas, qué entiende usted por «cercano» (¿cinco minutos a pie?, ¿quince minutos en coche?) y a qué se refiere con «no demasiado caro» (¿menos de 15 euros por persona?, ¿menos de 50?).

Los métodos empleados por Smith para solucionar esa clase de problemas rechazan el modelo estándar. En lugar de interpretar palabras como «cercano» o «caro» sobre la base de una regla semántica fija, se consideran numerosas interpretaciones y se compara el «coste» de cada una de ellas. Aunque dicho coste depende de una gran cantidad de factores, una de las maneras de evaluarlo consiste en compararlo con los usos anteriores de la expresión relevante. Estos fungen como «muestras de uso» y desempeñan una función similar a la de las muestras de color en nuestra discusión anterior. Si nos encontramos con que las casas son de color azul oscuro y azul grisáceo, y nuestro objetivo consiste en identificar esta última, resultará menos costoso referirnos a ella con el término «gris» que con el término «azul». El modelo de Smith concluiría, por tanto, que cuando Fabiola dice «vivo en la casa azul», la vivienda que tiene en mente se corresponde con la de color azul oscuro.

El proyecto para desarrollar programas de cómputo que interpreten de manera sensata el lenguaje natural se encuentra aún en sus inicios. Sin embargo, la investigación de Smith sugiere que, para lograr dicho fin, podría ser necesario abandonar el modelo estándar.

PARA SABER MÁS

Podrá encontrar una descripción más detallada del modelo estándar y el modelo alternativo en mi artículo **A plea for semantic localism**, que aparecerá publicado próximamente en la revista *Noûs*.



COGNITIVE BIOLOGY. DEALING WITH INFORMATION FROM BACTERIA TO MINDS,

por Gennaro Auletta. Oxford University Press; Oxford, 2011.

Biología cognitiva

Fundamentación en la mecánica cuántica y en la teoría de la información

Igual que aconteció con las fronteras de la física, en particular con la cuántica, las fronteras de la biología buscan planteamientos unificadores y tender puentes entre orillas que se creían irreconciliables. Así ocurre con el campo orgánico y el dominio de la cognición. El marco de esa aproximación lo pergeña la biología de sistemas. A través de la cognición, el organismo se muestra capacitado para habérselas con su entorno. Una actividad que, se supone, depende de la teoría de la información basada en probabilidades bayesianas.

El organismo se considera un sistema cibernético, un regulador de su propia homeostasis (el sistema metabólico) y un sistema selectivo que separa el yo del no-yo (la membrana en los organismos unicelulares). Todo organismo es un sistema complejo que puede sobrevivir solo si es capaz de mantener su orden interno frente a la tendencia espontánea hacia la disgregación. Por tanto, se ve obligado a seguir y controlar su entorno y, de ese modo, establecer circuitos de realimentación que resultan en una coadaptación. Los procesos cognitivos y los biológicos son inseparables. En la nueva disciplina, la neurociencia cognitiva se sitúa en su sustrato biológico. Mas, para buscar las bases biológicas de la cognición, hay que remitirse a la física y a la teoría de la información, ambos puntales profundamente conectados en la mecánica cuántica.

Detallada la naturaleza, adquisición y meditación de la información, se explicita esta en los principios generales de autoorganización y dinámica de los sistemas biológicos. Compete al lenguaje y la consciencia interpretar la información. Al cerebro se le considera soporte orgánico de la creación de inferencias a partir de la información de los sentidos, generador de predicciones y comprobador de hipótesis a través de su interacción con el mundo.

Se han realizado avances significativos en bioquímica y biología molecular. Pese a ello, parece cada vez más cierto que las metodologías reduccionistas tradicionales resultan insuficientes para abordar la complejidad de sistemas y problemas que van ocupando el centro de investigación. La exposición biológica y su lenguaje se han espejado en las explicaciones de la química y, en última instancia, de la física. Lo observamos en la búsqueda de una causalidad de los procesos. A los conceptos de masa, energía y fuerza, que a escala molecular y química implican fuerzas moleculares, concentración de determinadas sustancias químicas, velocidad de reacción, etcétera, hemos de añadir, cuando abordamos niveles superiores de organización biológica, los de fenómenos disipativos, temporización diferencial, procesos degenerativos y otros.

Por su lado, la ciencia cognitiva, joven disciplina creada con aportaciones de la psicología, neurología, teoría de redes neurales e inteligencia artificial, ha dado también pasos importantes en la conceptualización y el diseño de experimentos. El problema principal que atañe a la biología cognitiva es el de encontrar una mediación oportuna entre la teoría de la complejidad, importante para la biología, y el tratamiento mecánico-cuántico de la información, importante para la cognición. Ese nexo puede descubrirse en la noción de control de la información que tiende puentes entre procesos metabólicos y aspectos relativos a la información.

Cuando se abordan las relaciones entre física y biología, caben tres caminos posibles: apoyarse en la física clásica y la metodología reduccionista tradicional (buscar los fundamentos de la biología en conceptos y leyes de la física); rechazar cualquier nexo con la física para garantizar un fundamento autónomo para la biología; mostrar que la teoría física más revolucionaria, la mecánica cuántica, permite a la biología una conexión con la física que le faculta un fundamento autónomo sin violar las leyes de la física. Auletta sigue la tercera vía. Al afirmar que las ciencias biológicas, neurológicas o psicológicas deben reducirse a la física, se piensa en un reduccionismo ontológico a la física clásica (o la química clásica), como si estas constituyeran el paradigma definitivo de la ciencia. Pero el alcance de la física clásica (y la química clásica) ha quedado limitado a la resolución de determinados problemas. Ha ocupado su lugar, como explicación física del mundo, la mecánica cuántica.

En la búsqueda de nexos entre biología y mecánica cuántica se adelantaron Niels Bohr, Ernst Pascual Jordan, Max Delbrück y, sobre todo, Erwin Schrödinger. Andando el tiempo, Roger Penrose negaría que el cerebro funcionase como un ordenador clásico. En su opinión, el cerebro podía realizar cálculos aunque el problema no se hallara bien definido. La mecánica cuántica podría ser la solución de ese tratamiento anómalo de la información, una idea revolucionaria, aun cuando no se requiera que el cerebro se rija por las leyes de la física cuántica (en razón de la inmensa complejidad de su organización). Sabido es que las leyes cuánticas no regulan propiedades concretas de sistemas físicos, sino amplitudes de probabilidad. Del hecho de que la mecánica cuántica no regule sucesos concretos se infieren importantes consecuencias: queda margen para la aparición de nuevos tipos de sistemas físicos (imposible si el mundo estuviera regulado por las leyes de la mecánica clásica) y aporta condiciones necesarias para la aparición de la vida.

La física clásica se basaba en dos supuestos: todos los procesos y parámetros físicos relevantes son continuos (principio de continuidad) y todas las propiedades de un sistema físico están determinadas (principio de la determinación perfecta). Ambos supuestos fundamentales se violan en la mecánica cuántica: el principio de continuidad por el principio de cuantización y el supuesto de la determinación perfecta por el principio

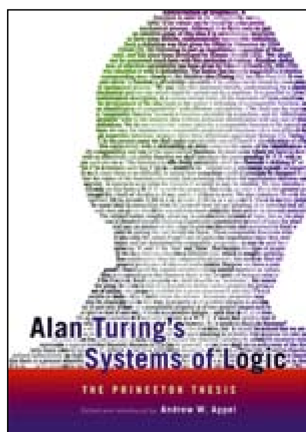
de superposición. Los sistemas mecánico-cuánticos, por elementales que sean, pueden considerarse fuente de información en nuestro mundo y procesadores de la misma.

La mecánica cuántica nos enseña que cada transmisión o adquisición de información será una combinación de un comportamiento discreto, local (selección de información) y de una conducta global, continua y ondulatoria. El cerebro es uno de esos sistemas clásicos que despliega ambos aspectos. Se caracteriza por dos fenómenos: la información se adquiere a modo de espigas, en términos discretos, mientras que la actividad global de procesamiento, en la que intervienen muchas neuronas o diversas áreas, presenta una forma ondulatoria. Durante siglos se pensó que el cerebro representaba el mundo externo de una forma pasiva, a la manera de imagen especular de los objetos y sus características; se reservaba para la mente el procesamiento lógico de la información así adquirida. En los últimos años ha ido ganando fuerza la tesis de que el cerebro interviene en el propio sesgo de la percepción, en su anticipación. De ese modo, vamos conociendo mejor las raíces biológicas de la cognición. La biología no es irrelevante para la cognición, ni esta, irrelevante para aquella.

Aunque arquetípico para hablar de información, el cerebro no es el único sistema biológico que se ocupa de la información. En los animales superiores encontramos tres sistemas que la tratan: el sistema sensorial periférico, los sistemas reguladores, en particular, el sistema hormonal, y el sistema nervioso central. Entre los vertebrados, compete al sistema sensorial adquirir información, procesarla y transmitirla al sistema nervioso central; el sistema hormonal regula la transmisión e intercambio de información; por fin, la función específica del sistema nervioso central consiste en adquirir información (procedente del sistema sensorial) y, en las áreas sensoriales y motoras, procesarla y controlar el intercambio de información. El sistema hormonal transmite información a través de las hormonas liberadas por las glándulas. En particular, regula los sistemas circulatorio, digestivo y reproductor, aparte de su influencia sobre el cerebro y el sistema nervioso central. La información del cerebro se transfiere también a través de la difusión local de moléculas neuroquímicas en una forma paracrina.

No existe isomorfismo entre el cerebro y los objetos externos, aun cuando, en un sentido más restringido, podemos hablar de cartografía topográfica y central. De acuerdo con la regla de Hebb, cuando un axón de una neurona participa reiteradamente en la excitación de otra neurona, se produce un proceso de desarrollo o cambio metabólico en una o ambas células, de suerte que pueden excitarse al alimón con alta probabilidad. Esta es la base teórica de la teoría conexionista de las redes neurales.

—Luis Alonso



ALAN TURING'S SYSTEMS OF LOGIC. THE PRINCETON THESIS.

Dirigido por Andrew W. Appel. Princeton University Press; Princeton, 2012.

Turing

Su tesis doctoral

Numerosas han sido las contribuciones realizadas en homenaje a Alan Turing, coincidiendo con el centenario de su nacimiento, en 1912. Al legado de este fundador de la ciencia de la computación y la inteligencia artificial ha dedicado la colección *Temas de Investigación y Ciencia* un número monográfico. De entre sus propios escritos el libro de cabecera es, sin lugar a dudas, la obra más interesante. Allí se avanzaron las ideas que resultaron decisivas para determinar el rumbo de la computación y la matemática.

Entró en el King's College de Cambridge en 1931. De 1931 a 1934 se sintió atraído por diversas partes de la matemática, incluida la lógica matemática. En 1935 fue elegido *fellow* del King's College, tras su disertación sobre teoría de la probabilidad, *On the Gaussian error function*, donde redescubría de forma independiente el teorema central del límite. A comienzos de ese año empezó a interesarse en problemas de lógica, con un curso impartido por M. H. A. Newman.

Uno de tales problemas era el de la decisión (*Entscheidungsproblem*), la cuestión de si existe un método eficaz para decidir, dada cualquier fórmula bien formada del cálculo de predicados de primer orden, si es o no válida en todas las interpretaciones posibles. Eso se había resuelto en afirmativo para determinadas clases especiales de fórmulas, pero el problema general seguía abierto en esa época. Se hallaba convencido de que la respuesta debía ser negativa, si bien para demostrar la imposibilidad de un procedimiento de decisión tendría que ofrecer una explicación matemática exacta de lo que significa ser computable mediante un proceso estrictamente mecánico.

A ese análisis llegó a mediados de abril de 1936, a través de lo que daría en llamarse máquina de Turing: un mecanismo ideal de computación subsiguiente a un elenco finito de instrucciones (un programa) en etapas discretas efectivas sin limitación de tiempo ni espacio. Plasmó su investigación en el artículo titulado «On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem*». Introdujo la idea de que la computación podía actuar sobre estructuras simbólicas generales, no necesariamente aritméticas. En particular, sacó partido del hecho de que un programa sea una de esas estructuras. Newman se mostró en un principio escéptico ante el análisis de Turing, pero luego se convenció y le animó a publicarlo. A los veinticuatro años había, pues, ideado un modelo universal de computación, o má-

quina de Turing, y demostrado su teorema de incompletitud, que hizo públicos en el artículo antes mencionado, con la corrección incorporada en 1937.

Kurt Gödel había formulado en 1931 la tesis de la incompletitud. Sus métodos (la codificación numérica de la sintaxis y el procesamiento numérico de la lógica) sentaron las bases para numerosas técnicas de ciencia de la computación. Estableció la teoría de las funciones recursivas. Se valió de los enteros para idear un lenguaje universal capaz de codificar computaciones arbitrarias y algoritmos generales que podrían demostrar teoremas. Por su parte, Alonzo Church había presentado el cálculo lambda como modelo de computación; de acuerdo con su tesis, las funciones recursivas caracterizan exactamente las funciones efectivamente calculables.

Muestra del genio de Gödel fue sustituir la idea informal de verdad por un concepto que podía formalizarse: la idea de prueba. Aplicando la noción formal de prueba, Gödel mostró que debía existir algún enunciado sobre los números que no podía ser ni demostrado ni contradicho utilizando las reglas de la deducción lógica, aunque podía verse que ese enunciado era cierto traspasando el sistema lógico y contemplando el enunciado desde una perspectiva metalingüística. Con otras palabras, el teorema de incompletitud de Gödel expresaba que existía en matemática un componente semántico irreductible. Turing continuaba la revolución de la lógica iniciada por Gödel. Describió su argumento matemático de manera similar a la empleada por el austríaco. Pero Turing abordó con éxito la cuestión planteada por Hilbert sobre la decidibilidad y lo hizo fundándose en un análisis filosófico enteramente original del concepto de computación.

Por recomendación de Newman, Turing decidió pasar un año estudiando con Church. Solicitó una beca Procter. Se la negaron. Hubo de contentarse con la exigua subvención de su King's College. Llegó a Princeton a finales de septiembre de 1936. Allí, el departamento de matemáticas se había convertido ya en meca de referencia. En el Instituto de Estudios Avanzados estaban Albert Einstein, John von Neumann y Hermann Weyl, en el departamento Lefschetz. Profesores visitantes ese año fueron Courant y Hardy. En lógica esperaba encontrar, además de Church, a Gödel, Bernays, Kleene y Rosser. Gödel visitó el instituto en los años 1933, 1934 y 1935; acortó su última estancia, por enfermedad, y no volvió hasta 1939. Bernays había visitado Princeton en 1935-36; no volvió a Estados Unidos hasta después de la guerra. Kleene y Rosser habían recibido el doctorado por la época en que Turing llegó y habían buscado trabajo en otros sitios. Se vio pues limitado a asistir a las clases de Church que encontraba excesivamente precisas. No parece que intimaran.

Church reconocía en 1937 que en la exposición de Turing había tres nociones diferentes: computabilidad por una máquina de Turing, recursividad general en el sentido de Herbrand-Gödel-Kleene y definibilidad lambda en el sentido de Kleene y Church; de ellas, la primera tiene la ventaja de hacer evidente de inmediato la identificación con la eficacia en el sentido ordinario; la segunda y la tercera presentan la ventaja de la idoneidad para su incorporación en un sistema de lógica simbólica. Así nació lo que dio en llamarse tesis de Church-Turing; de acuerdo con la misma, las funciones efectivamente computables son exactamente las computables por la máquina de Turing.

¿Y la tesis de Princeton? En la primavera de 1937 Turning desarrolló una prueba más detallada sobre la equivalencia de la computabilidad de la máquina con la definibilidad lambda. Publicó también dos artículos sobre teoría de grupos; de ellos, el dedicado a aproximaciones finitas de grupos continuos llamó la atención de Von Neumann. El jefe del departamento de matemáticas, Luther P. Eisenhart, animó a Turing a pasar otro año en Princeton y solicitar de nuevo la beca Procter. En esta ocasión, avalado por Von Neumann, que ponderaba su trabajo sobre funciones casi periódicas y grupos continuos, logró la subvención, que le permitía dedicarse a su tesis doctoral sobre lógicas ordinales, dirigida por Church.

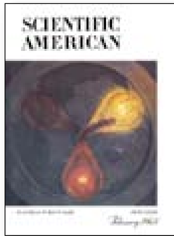
Aprobada en mayo de 1938 y publicada en 1939 con el título *Systems of logic based on ordinals*, la tesis constituía el primer intento sistemático de abordar la idea natural de superar la incompletitud godeliana de sistemas formales mediante la iteración de la agregación de enunciados, tales como la consistencia del sistema. De hecho, esas clases de iteraciones pueden extenderse hasta lo transfinito. Su principal resultado fue que podíamos obviar la incompletitud para una clase importante de enunciados aritméticos, aunque no para todos. Lo adelanta en la introducción: «El conocido teorema de Gödel revela que todo sistema de lógica es, en cierto sentido, incompleto, mas al propio tiempo aporta los medios por los que a partir de un sistema L de lógica puede obtenerse un sistema L' más completo. Mediante la repetición del proceso, obtenemos la secuencia L, $L_1 = L'$, $L_2 = L'_1$... cada vez más completa que la anterior. Podría entonces construirse una lógica L_w en la que los teoremas demostrables fueran la totalidad de teoremas demostrables con la ayuda de las lógicas L, L_1, L_2... Procediendo de esta forma podemos asociar un sistema de lógica con cualquier ordinal constructivo. Podríamos preguntarnos si una tal secuencia de lógicas de este tipo es completa en el sentido de que a cualquier problema A le corresponde allí un ordinal a tal que A por medio de la lógica L_a». Valiéndose de un ingenioso argumento, Turing obtuvo un resultado de completitud parcial que reclamaba ulterior investigación. Reconocería problemas importantes en su lógica ordinal.

Tras la publicación de la tesis no volvió al tema de la misma. Al poco de su regreso a Inglaterra participó en la Escuela de Códigos y Cifras del Gobierno, que habría de llevarle hasta su trabajo secretísimo en Bletchley Park durante la guerra: abrir el código cifrado de la Marina alemana, empleando mecanismos de computación, aunque no máquinas de Turing. Tras la guerra puso en práctica sus ideas sobre computación al supervisar la construcción del ACE (Automatic Computing Engine) del Laboratorio Nacional de Física; redactó el plan detallado de funcionamiento. Mas su idea de un computador digital electrónico automático con almacenamiento interno de programas no pudo concretarse hasta después de su muerte, cuando el avance de la electrónica lo permitió.

En 1948 inventó el método de descomposición LU en la computación numérica. Dos años más tarde roturó el terreno de lo que sería la futura inteligencia artificial y realizó predicciones notablemente precisas sobre los derroteros que habrían de seguir computación y computadores. En 1952 se dejó atraer por la aparición de formas en las estructuras biológicas (pautas de las flores, simetría de los huesos o manchas de los tigres). Murió a los 42 años. Se cree que se suicidó angustiado por las normas inglesas dictadas contra la homosexualidad.

—Luis Alonso

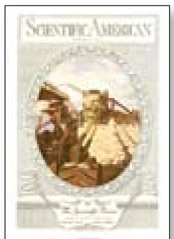
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Febrero 1963

Prosperidad pagada de sí misma

«Los ciudadanos estadounidenses —conocidos por su prosperidad y por la satisfacción no exenta de suficiencia que esta les produce— podrían sorprenderse al saber que unos sondeos de opinión pública realizados en Alemania Occidental, Brasil y Cuba han mostrado que los pueblos de esos países se siente aún más ufanos por los progresos recientes y más esperanzados ante el futuro. Asimismo, otra lección para los americanos podría ser el enterarse de que en dichos países se identifica más estrechamente el bienestar personal con la buena marcha del país. Son aseveraciones de índole muy general que representan los primeros descubrimientos de un trabajo piloto encaminado a desarrollar una técnica que permita realizar estudios comparativos, a escala transnacional, sobre las inquietudes y aspiraciones de los pueblos del mundo. —Hadley Cantril»



Febrero 1913

La muerte de Scott

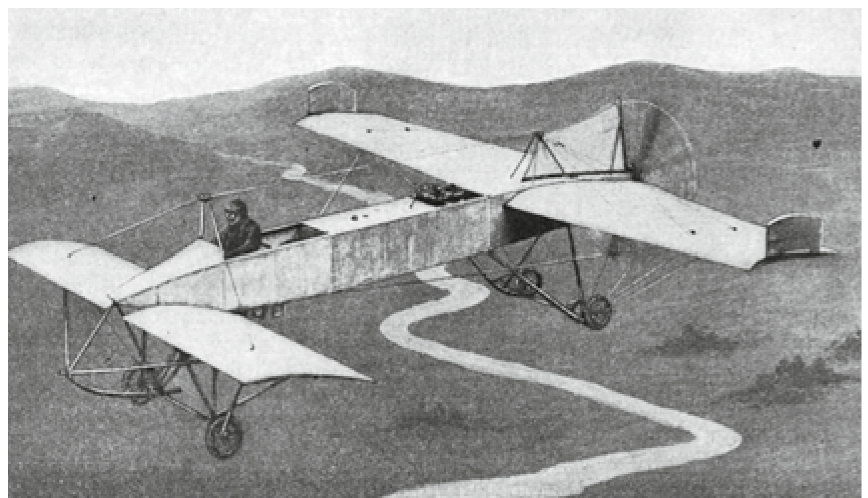
«En el desolado y gélido erial de una inexplorada tierra antártica entregó su vida el capitán Robert Falcon Scott tras haber alcanzado el Polo Sur. Su muerte es la de un auténtico héroe de la ciencia. No había tesoro enterrado alguno que buscar en aquellas nieves nunca antes holladas, ni cosa otra alguna, salvo la fama imperecedera. Solo los comprometidos con la investigación científica pueden entender los ideales de quien gustosamente se aísla del mundo durante tres años y muere en una tormenta de nieve. ¿Para qué? En busca de información meteorológica, de datos geológicos, de más luz sobre la flora y la fauna de una tierra blanca, fría y silenciosa que probablemente nunca será poblada; en dos palabras: en busca de unas cosas infinitamente alejadas de la pasión por el oro.»

Las pinturas de Altamira

«¿Por qué los artistas primitivos de las pinturas paleolíticas de Altamira prefirieron decorar los recovecos más oscuros de sus moradas en vez de practicar su arte allá donde la luz del sol les hubiera sido de ayuda? Parece probable que esas pinturas no se hicieran por amor a la belleza ni para mostrar la "buena mano" de los *giottos* paleolíticos, sino con fines estrictamente económicos. Eran, en realidad, unos trabajos alimentarios cuyo propósito consistía en abastecer la despensa. Según una hipótesis, los hombres paleolíticos del sur de la Galia y del norte de España creían en el poder de sus pinturas de ciervos, jabalíes, uros, caballos (considerados un manjar) y mamuts para atraer a los animales mismos.»

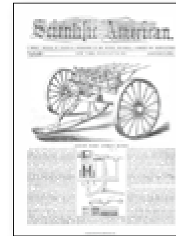
Avión estabilizado

«El aparato más reciente con estabilización automática es el monoplano Drzewiecki de plano retrasado (*véase la ilustración*), exhibido en el último Salón de París. Es del tipo Langley. Su característica más interesante es que las alas están montadas con una diferencia de tres grados. Se generan así unas fuerzas de adrizado que contrarrestan el picado y mantienen nivelada la quilla. Su diseño es el resultado de experimentos realizados en el laboratorio de aerodinámica de Eiffel.»



Avión de diseño estable: El talentoso inventor polaco Stefan D. Drzewiecki fue conocido por sus trabajos sobre hélices y submarinos, y por este interesante aeroplano de 1913.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVIII, N.º 6, 8 DE FEBRERO DE 1913



Febrero 1863

Una estadística horripilante

«La media de suicidios en Francia llega ya a los diez diarios. No pasa un día sin que se pueda relacionar directamente algún suicidio con la frustración vital; con la falsa moralidad que inculcan escritores perversos o ignorantes; con el fracaso de los padres en conseguir una influencia adecuada sobre sus hijos; o con unos apetitos y pasiones sin freno.»

Buenos alimentos islandeses

«En Islandia, el alimento cotidiano se compone sobre todo de pescado crudo seco y salado y de *skyr*. Esto último es leche que se deja acidificar y coagular, y que luego se suspende en un saco hasta que se escurre el suero. De ese modo resulta más nutritivo y saludable que la leche fresca, al ser más digestivo que esta. Quienes se aficionan al *skyr* lo encuentran ligero, apetitoso y agradablemente refrescante. Los shetlandeses preparan la leche de la misma manera y la llaman "leche de suero" en la primera fase y "leche colgada" cuando ya se hace *skyr*. Nuestra idea de que la leche agria es inane y perjudicial no es sino un prejuicio ignorante. Aquellos cuya subsistencia depende principalmente de una dieta láctea prefieren la leche agria, y las autoridades médicas respaldan esa preferencia.»

EVOLUCIÓN

La humanidad en el espacio

Cameron M. Smith

Cómo viajarán las generaciones futuras desde nuestro hogar terrestre hasta planetas y destinos más lejanos, y qué consecuencias entrañará ello para la especie.





BIOLOGÍA

Maravillas diminutas

Kate Wong

El microscopio óptico desvela maravillas ocultas del mundo natural.

NEUROCIENCIA

Colaboración sensorial

Lawrence D. Rosenblum

Nuestros sentidos cooperan más de lo que se pensaba. Lo que oímos depende de lo que vemos y tocamos.

DOSSIER SOBRE FÍSICA CUÁNTICA

El gato de Schrödinger en el banco de pruebas

Markus Aspelmeyer y Markus Arndt

Extraño y de cuerda

Subir Sachdev

Una nueva ilustración

George Musser

El cuanto no cuántico

David Tong



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *Los daguerrotipos evanescentes y Hace...*; Fabio Teixidó: *Inviernos extremos y Gemas*; Maite Beltrán: *El observatorio infrarrojo Herschel y El universo invisible de Herschel*; Nuria Estapé: *Terapia de la depresión*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Juan Pedro Adrados: *Superabundancia de planetas*; Xavier Roqué: *Historia de la ciencia*; Sara Arganda: *Foro científico*; Pere Molera: *Taller y laboratorio*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España